

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФГАОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПЕРВОГО
ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н.ЕЛЬЦИНА»

УДК 537.226; 537.624; 537.635; 544.13

№ госрегистрации РК 01200905772

Инв. № _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель проректора по экономике
и стратегическому развитию

_____ В.В. Кружаев

«14» августа 2011 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры
инновационной России» на 2009-2013 годы

Государственный контракт № 02.740.11.0171 от 25 июня 2009 г.

Шифр заявки «2009-1.1-407-039-009»

по теме:

**ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ
ПРИНЦИПОВ**

(заключительный, этап №6)

Наименование этапа: «Разработка конструкций, создание и испытание образцов датчиков
конкретного применения с улучшенными эксплуатационными характеристиками и
топливного элемента. Анализ и систематизация полученных результатов. Испытание и
отладка узлов ЭПР спектрометра»

Руководитель НИР, д.ф-м.н., проф.

_____ В.О.Васьковский
(подпись)

«14» августа 2011 г.

Екатеринбург 2011

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель:
зав. каф., д.ф.-м.н.,
профессор

_____14.08.11
подпись

В. О. Васьковский –
руководство НИР, обобщение
полученных результатов
(раздел 1, введение, заключение)

Исполнители:

Зам. проректора
по экономике и
страт. развитию
УрФУ

_____14.08.11
подпись

В.В. Кружаев
организация исследований,
обобщение результатов

Доцент, д.ф.-м.н.

_____14.08.11
подпись

М.И. Барташевич –
эксперименты по
наноструктурированию объектов

Мл. науч. сотр.

_____14.08.11
подпись

К.Г. Балымов –
исследование межслойной обменной
связи анизотропии (раздел 1)

Науч. сотр.
к.ф.-м.н.

_____14.08.11
Подпись

С.О. Волчков –
исследования магнитного импеданса
многослойных плёнок (раздел 1)

Вед. науч. сотр.,
д.ф.-м.н.

_____14.08.11
Подпись

Г.В. Курляндская –
исследование магнитного импеданса
многослойных плёнок

Зав.сектором,
к.ф.м.н.

_____14.08.11
Подпись

В.Н. Лепаловский –
получение многослойных плёнок

Мл. науч. сотр.,
к.ф.-м.н.

_____14.08.11
Подпись

А.Г. Пашко –
исследование доменной структуры
плёнок

Доцент, к.ф.-м.н., _____14.08.11 Подпись	П.А. Савин – исследование доменной структуры плёнок
Доцент, к.ф.-м.н. _____14.08.11 Подпись	Е.А. Степанова – прецизионная магнитометрия
Вед. технолог, к.ф.- м.н. _____14.08.11 Подпись	А.В. Свалов – исследование ультратонких слоистых плёнок
Инженер- исследователь _____14.08.11 Подпись	Е.В.Цыганов – компьютерное моделирование
Науч. сотр. _____14.08.11 Подпись	А.А. Ювченко – программное обеспечение измерений (раздел 1)
Декан, д.х.н., профессор _____14.08.11 Подпись	В.А. Черепанов – разработка программы внедрения НИР в образовательный процесс (раздел 2)
Доцент, к.х.н. _____14.08.11 Подпись	А.Ю. Зуев – публикация статьи за отчетный период
Зав. отделом, д.х.н. _____14.08.11 Подпись	А.А. Остроушко – публикация статьи за отчетный период
Профессор, д.ф.- м.н. _____14.08.11 Подпись	А.П. Сафронов – написание некоторых подразделов отчета
Доцент, к.х.н. _____14.08.11 Подпись	Л.Я. Гаврилова – руководство исследованиями по химической совместимости оксидных материалов

Доцент, к.х.н.	_____14.08.11 Подпись	А.И. Вылков – измерения кислородной проводимости
Доцент, к.х.н.	_____14.08.11 Подпись	Е.А. Филонова – руководство исследованиями по термомеханической совместимости оксидных материалов
Доцент, мл. науч. сотр., к.х.н.	_____14.08.11 Подпись	Т.В. Аксенова – моделирование дефектной структуры оксидных материалов
Ассистент, вед. инженер	_____14.08.11 Подпись	Д.С. Цветков – проведение дилатометрических измерений
Вед. инженер, инженер 1 категории	_____14.08.11 Подпись	С.И. Войтович – исследования по химической совместимости оксидных материалов
Науч. сотр., к.х.н.	_____14.08.11 Подпись	Е.А. Киселев – написание некоторых подразделов отчета
Профессор, директор УЦКП УрГУ, гл. науч. сотр.	_____14.08.11 Подпись	В.Я. Шур – общее руководство разделом 3, постановка задачи, написание отчета (раздел 3)
Зав. лаб, д.ф.м.н.	_____14.08.11 Подпись	В.А. Важенин – кинетика доменной структуры (раздел 3)
Зав. сектором, к.ф.м.н.	_____14.08.11 подпись	И.С. Батурин – методика создания микродоменных структур с использованием системы периодических электродов (раздел 3)
Старший науч. сотр., к.ф.-м.н.	_____14.08.11 Подпись	Д.К. Кузнецов – создание доменных структур воздействием импульсного лазерного излучения (раздел 3)

Науч. сотр., к.ф-м.н.	_____14.08.11 Подпись	А.И. Лобов – компьютерное моделирование (раздел 3)
Зав. сектором, к.ф-м.н.	_____14.08.11 Подпись	Д.В. Пелегов – кинетика доменной структуры при переключении поляризации (раздел 3)
Зав. сектором, к.ф-м.н.	_____14.08.11 Подпись	Е.И. Шишкин – сканирующая зондовая микроскопия (раздел 3)
Ст. науч. сотр. к.ф-м.н.	_____14.08.11 Подпись	Е.В. Николаева – сканирующая зондовая микроскопия (раздел 3)
Науч.сотр., к.ф-м.н.	_____14.08.11 Подпись	О.В. Якутова – кинетика доменной структуры при переключении поляризации (раздел 3)
Мл. науч. сотр.	_____14.08.11 Подпись	М.С. Небогатилов – СЛКМ-КР визуализация (раздел 3)
Старший науч. сотр.	_____14.08.11 Подпись	Е.Л. Румянцев – Кинетика доменной структуры
Мл. науч. сотр	_____14.08.11 Подпись	М.В. Конев – Методика создания микродоменных структур с помощью периодических электродов
Мл. науч. сотр.	_____14.08.11 Подпись	Е.В. Пелегова – обработка результатов, оформление отчета (раздел 3)
Зав. сектором, к.ф-м.н.	_____14.08.11 Подпись	А.И. Рокеах – Общее компоновочное решение спектрометра ЭПР (раздел 4)

Главный специалист, к.ф.-м.н.	_____14.08.11 Подпись	М.Ю. Артёмов – Компоновка и трассировка данных плат
Вед. инженер	_____14.08.11 Подпись	Н.П. Шерер материальное сопровождение работ
Аспирант	_____14.08.11 подпись	А.Н. Горьковенко – магнитометрические измерения
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	М.О. Тонкушина – синтез и РФА электролитных материалов
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	О.В. Русских – синтез и РФА электролитных материалов
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	Д.О. Аликин – СЛКМ-КР визуализация (раздел 3)
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	А.Р. Ахматханов – (раздел 3) Фотолитография
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	М.А. Долбилов – модификация поверхности методами протонного обмена; оптическая профилометрия (раздел 3)
Науч. сотр, к.ф.-м.н.	_____14.08.11 подпись	П.С. Зеленовский – СЛКМ-КР визуализация (раздел 3)
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	А.В. Иевлев – силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика (раздел 3)

Аспирант	_____14.08.11 Подпись	А.А.Тюрнина – метрологическое обеспечение измерений
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	В.А. Шихова – кинетика доменной структуры при переключении поляризации (раздел 3)
Мл. науч. сотр, к.ф-м.н.	_____14.08.11 Подпись	Е.А. Мингалиев, участие в исследованиях доменной структуры сегнетоэлектриков
Студент, лаборант- исследователь	_____14.08.11 Подпись	К.Г. Муратшина, исследование доменной структуры,
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	Д.А.Букреев исследование магнитного импеданса
Студент, лаборант- исследователь	_____14.08.11 Подпись	В.И. Пряхина, участие в исследованиях доменной структуры сегнетоэлектриков
Студент, лаборант- исследователь	_____14.08.11 Подпись	В.С. Торопов. участие в исследованиях доменной структуры сегнетоэлектриков
Студент	_____14.08.11 Подпись	А.В. Расковалов, участие в исследованиях доменной структуры сегнетоэлектриков
Студент, лаборант- исследователь	_____14.08.11 Подпись	М.С. Кособоков, участие в исследованиях доменной структуры сегнетоэлектриков
Студент	_____14.08.11 Подпись	Н.А. Чумак, участие в исследованиях доменной структуры сегнетоэлектриков

Студент	_____14.08.11 Подпись	А.А. Бучкевич – программное обеспечение измерений
Студент	_____14.08.11 Подпись	Н.С. Маюра – измерение магнитосопротивления
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	Н.А. Кулеш – измерение магниторезистивных свойств
Студент	_____14.08.11 Подпись	Н.В. Урусова – измерение магнитных свойств
Студент	_____14.08.11 Подпись	В. А. Черезова – измерение магнитных свойств
Студент, инженер	_____14.08.11 Подпись	И.Л. Иванов – выполнение рентгеновских исследований
Студент, инженер	_____14.08.11 Подпись	И.В. Урусов – измерение электропроводности оксидных материалов
Студент, лаборант- исследователь	_____14.08.11 Подпись	Н.А. Волосач – синтез электродных материалов
Студент, лаборант- исследователь	_____14.08.11 Подпись	С.А. Моричев – синтез электродных материалов
Аспирант	_____14.08.11 Подпись	А.С. Подзорова – исследование химической совместимости материалов

Аспирант	_____14.08.11 Подпись	Н.Е. Волкова – исследование химической совместимости материалов
Студент, лаборант	_____14.08.11 Подпись	В.В. Середа – измерения кислородной нестехиометрии
Студент	_____14.08.11 Подпись	Н.С. Сарычева – спекание оксидной керамики
Студент, лаборант- исследователь	_____14.08.11 Подпись	А.С. Дмитриев – синтез электродных материалов
Студент	_____14.08.11 Подпись	М.Ю. Митрофанова – спекание оксидной керамики
Студент	_____14.08.11 Подпись	Д.В. Власов – создание установок
Студент	_____14.08.11 Подпись	И.П. Клементьев – проектирование фотошаблонов
Аспирант, мл. науч. сотр	_____14.08.11 Подпись	М.Ф. Сарманова – модификация поверхности методами протонного обмена и ионной имплантации
Аспирант, мл. науч. сотр	_____14.08.11 Подпись	Д.С. Чезганов – кинетика доменной структуры при переключении поляризации
Студент, лаборант- исследователь	_____14.08.11 Подпись	Д.В. Зорихин – фотолитография

Студент	_____14.08.11 Подпись	Д.А. Карпов – компьютерное моделирование
Студент	_____14.08.11 Подпись	М.М. Нерадовский–сканирующая зондовая микроскопия
Студент	_____14.08.11 Подпись	А.П. Сосновских – кинетика доменной структуры при переключении поляризации
Студент, лаборент- исследователь	_____14.08.11 Подпись	С.А. Подольный – сканирующая зондовая микроскопия
Студент	_____14.01.11 Подпись	А.А. Разводов – сканирующая зондовая микроскопия
Нормоконтролёр	_____14.08.11 подпись	Е.А. Степанова

РЕФЕРАТ

Отчет: стр. 92, рис. 52, табл. 6, источников 42

<МАГНИТНЫЕ СЕНСОРЫ, ДАТЧИКИ, СЛОЖНЫЕ ОКСИДЫ, ЯЧЕЙКА, ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ, ДОМЕННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ, ЭПР-СПЕКТРОМЕТР, ИСПЫТАНИЕ>

Разработаны оптимальные принципы построения датчиков широкого применения с использованием сенсоров магнитного поля, функционирующих на основе эффектов магнитосопротивления и гигантского магнитного импеданса. Они использованы при создании новой топологии магниточувствительных элементов и конструктивных элементов датчика электрического тока.

Проведены испытания разработанных оксидных материалов для топливных элементов, в модельных электрохимических устройствах. Они включали получение требуемых оксидных материалов, проведение их аттестации, подготовку единичной ячейки топливного элемента планарного типа, проведение испытания опытного образца топливного элемента с двумя типами катодов. Получены вольтамперные характеристики и оценена эффективность работы устройства на полноту сгорания топлива, и стабильность работы во времени.

Выполнен анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого светового нагрева. Показана возможность применения периодических доменных структур и определена оптимальная номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения для построения приборов на новых физических принципах.

Проведено испытание разработанных и изготовленных узлов ЭПР-спектрометра, которое показало правильность выбора архитектуры и схемотехнических решений, использованных в приборе. Основные параметры ЭПР-спектрометра соответствуют запланированным, а некоторые параметры улучшены: потребляемая мощность уменьшена до 60 Вт, а габариты до 300*265*170 мм³.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	14
1 Разработка оптимальных принципов построения датчиков широкого применения с использованием сенсоров магнитного поля, функционирующих на основе эффектов магнитосопротивления и гигантского магнитного импеданса	16
1.1 Современные сенсоры магнитного поля	16
1.1.1 Конструктивные особенности АМС-датчиков и сферы их применения	16
1.1.2 Использование эффекта гигантского магнитного импеданса в плёночных ферромагнитных средах для детектирования магнитного поля	20
1.2 Разработка конструкции датчика тока на основе АМС-сенсоров	30
1.2.1 Совершенствование конструкции магнитных сенсоров	30
1.2.2 Разработка конструкции датчика тока	35
1.2.3 Результаты испытаний магнитного сенсора и датчика тока	36
1.3 Разработка и испытание мостовой схемы сенсора на основе ГМИ-элементов	38
2 Испытание опытного образца топливного элемента: снятие вольтамперных характеристик, оценка эффективности работы на полноту сгорания топлива, стабильности работы во времени	44
2.1 Сборка измерительной ячейки для испытания единичного топливного элемента	44
2.2 Методика аттестации топливного элемента	46
2.3 Аттестация топливного элемента с никель-керметным анодом и катодом из кобальтита лантана допированного стронцием состава $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_{3-\delta}$	46
2.4 Аттестация топливного элемента с Ni-керметным анодом и композитным катодом	49
2.5 Оценка эффективности и стабильности работы топливного элемента	53
3 Анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого немонахроматического	

светового нагрева. Анализ возможностей применения периодических доменных структур и определение оптимальной номенклатуры нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения для построения приборов на новых физических принципах	55
3.1 Анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого светового нагрева	55
3.1.1 Нагрев пропусканием импульсов тока вдоль металлического электрода, нанесенного на полярную поверхность	57
3.1.2 Облучение инфракрасными лазерными импульсами	58
3.1.2.1 Кинетика формирования доменной структуры в результате импульсного лазерного облучения	58
3.1.2.2 Зависимость параметров доменной структуры от условий облучения	64
3.1.3 Особенности формирования доменных структур, индуцированных ИК лазерным излучением, в ниобате лития, легированном MgO	67
3.2 Анализ возможностей применения периодических доменных структур и определение оптимальной номенклатуры нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения для построения приборов на новых физических принципах	68
4. Проверка правильности функционирования узлов спектрометра и прибора в целом и соответствия достигнутых параметров запланированным	76
4.1 Управляющее программное обеспечение верхнего уровня спектрометра ЭПР	76
4.2 Проверка правильности функционирования узлов спектрометра и прибора в целом	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
Список использованных источников	89

ВВЕДЕНИЕ

В ряду направлений развития современного приборостроения существенное место занимает разработка новых сред и физико-химических эффектов для первичных преобразователей и конверторов физических величин, которые в свою очередь определяют эффективность и качество функциональных устройств на их основе. Содержанием данного проекта является комплексное исследование в области магнитных, электрических, электрохимических свойств новых материалов и схемотехники с целью создания высокоточных измерительных приборов и устройств на основе новых физических принципах.

Сенсоры магнитного поля являются основой многих прогрессивных конструкторских решений в области магнитометрии, слаботочной аппаратуры и автоматики. Современные сенсоры отличаются универсальностью, высоким отношением полезный сигнал/шум, относительная простота технологий изготовления. Тем не менее, стремление к миниатюризации и снижению издержек производства электронной техники стимулируют поиск путей совершенствования сенсорных элементов. К числу задач на этом пути относится создание магниточувствительных элементов на эффекте анизотропии магнитосопротивления с так называемым внутренним магнитным смещением и на эффекте гигантского магнитного импеданса. Решение этих задач получено в проекте в рамках технологии наноструктурирования магнитных плёнок.

Твердо-оксидные топливные элементы и конверторы природного газа составляют важный элемент современной энергетики. Существующие варианты таких технологий многостадийны и включают отдельные этапы синтеза порошковых материалов, их диспергирования, приготовления шликеров (для формования и спекания несущих керамических конструкций) и суспензий для нанесения слоев (трафаретная печать, плазменное напыление и т.п.), и последующего их припекания к подложкам. К набору сведений, необходимых для изготовления сложных оксидных электрохимических устройств, в частности, топливных элементов, а также использования их в течение разумных времен относятся не только знание состава и структуры материалов, пригодных по своим физико-химическим характеристикам, но и умение грамотно сочленять отдельные элементы с разной химической природой, их стабильность при работе соответствующего устройства, химическая индифферентность в процессе работы. Соответствующие сведения получены в ходе выполнения данного проекта путём создания и оптимизации параметров модельных опытных образцов электрохимических устройств.

В последние годы стремительно развивается одно из направлений функциональной инженерии, целью которого является создание в сегнетоэлектрических нелинейно-оптических кристаллах периодических доменных структур с заданной геометрией. Наличие периодической доменной структуры с заданной геометрией позволяет качественно улучшить нелинейно-оптические и электрооптические свойства кристаллов и использовать их для создания новых типов устройств и, в частности, разнообразных когерентных источников света с преобразованием частоты излучения на основе эффекта квазифазового синхронизма. В этом случае, для получения высокой эффективности преобразования необходимо формировать прецизионную периодическую доменную структуру с отклонением периода от среднего значения не более чем на 20 нм. Такого рода технологии разработаны при выполнении данного проекта.

Одной из линий в развитии СВЧ-техники является миниатюризация. По проекту выполнена разработка малогабаритного автоматизированного ЭПР спектрометра, технические и эксплуатационные параметры которого обеспечат его широкую востребованность различными отраслями фундаментальной и прикладной науки, производства, службами охраны окружающей среды и здравоохранения (в частности для измерения поглощенных доз радиоактивного излучения, для ретроспективной дозиметрии по эмали зубов человека, для контроля качества пищевых продуктов, подвергнутых облучению для уничтожения патогенной микрофлоры), а также высшим специальным образованием соответствующих направлений.

В целом представленный отчёт содержит результаты научно-технической деятельности заключительного этапа комплексного проекта, направленного на разработку и практическое приложение новых физических принципов в приборостроении. Они соответствуют мировому уровню, востребованы наукоемкими отраслями экономики, а также способствовали подготовке и закреплению в сфере науки и образования молодых научных и научно-педагогических кадров.

1 Разработка оптимальных принципов построения датчиков широкого применения с использованием сенсоров магнитного поля, функционирующих на основе эффектов магнитосопротивления и гигантского магнитного импеданса

1.1 Современные сенсоры магнитного поля

Сенсоры магнитного поля является основой многих эффективных конструкторских решений в области магнитометрии, слаботочной аппаратуры и автоматики. Современные сенсоры отличаются универсальностью, высоким отношением полезный сигнал/шум, относительная простота технологий изготовления. Тем не менее, стремление к миниатюризации и снижению издержек производства электронной техники стимулируют поиск путей совершенствования сенсорных элементов. К числу задач на этом пути, в частности, относится создание магниточувствительных элементов на эффекте анизотропии магнитосопротивления (АМС) с так называемым внутренним магнитным смещением, а также планарных элементов на гигантском магнитном импедансе (ГМИ).

1.1.1 Конструктивные особенности АМС-датчиков и сферы их применения

Принцип действия датчиков, использующих эффект анизотропного магнитосопротивления (АМС), основывается на способности магниторезистивного материала датчика, например, пленки FeNi, изменять сопротивление в зависимости от взаимной ориентации протекающего тока и вектора намагниченности пленки. Сопротивление пленки $R \sim \cos^2\theta$, где θ - угол между направлением намагниченности и током (рисунок 1.1). Величина угла θ зависит от направления и величины внешнего магнитного поля.

АМС-датчики характеризуются относительно высокой чувствительностью и линейной функцией преобразования. Реализация последней требует специальных технических решений, направленных, в частности, на создание в используемой функциональной среде состояния с однородной намагниченностью. Для этого необходимо привести чувствительный элемент в состояние магнитного насыщения или, другими словами, создать в нём магнитное смещение. В простейшем случае это достигается с помощью внешнего источника магнитного поля, представляющего собой постоянный магнит (рисунок 1.2) или токовую катушку. Однако такого рода конструкции имеют ряд функциональных недостатков, а также усложняют технологию производства сенсоров.

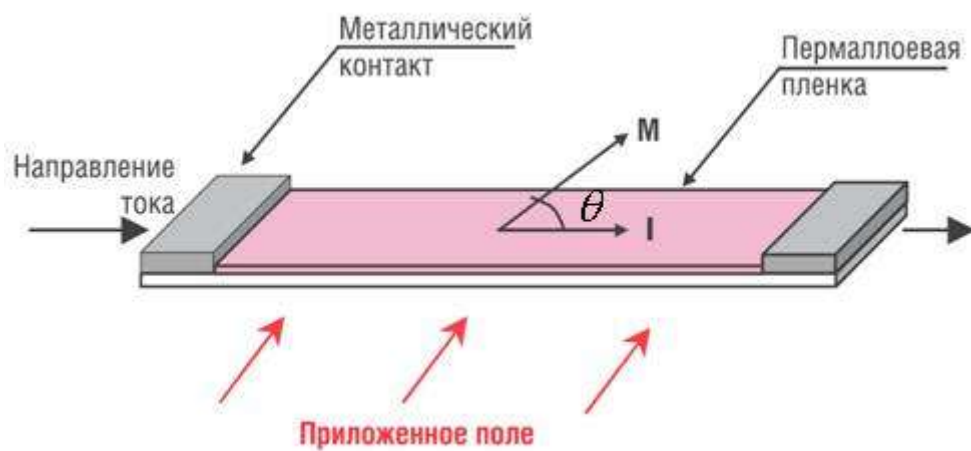


Рисунок 1.1 – Схема, иллюстрирующая принцип действия датчика, основанного на анизотропном магнитосопротивлении [1]

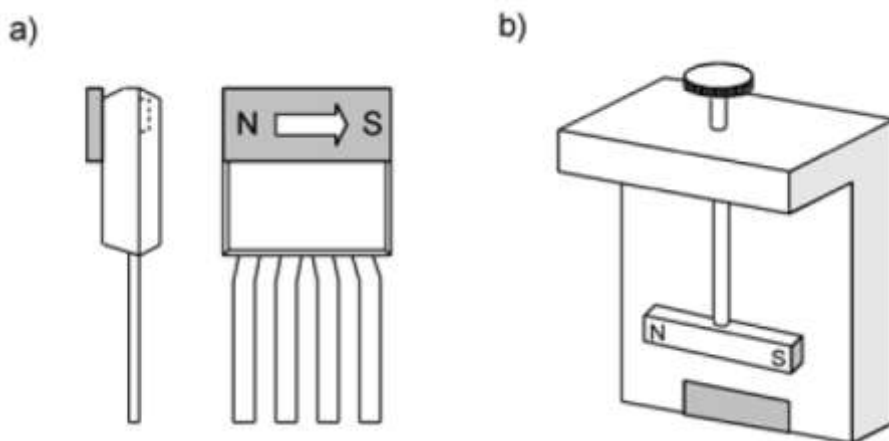


Рисунок 1.2 – Примеры АМС-датчиков, использующих смещающую систему на основе внешнего постоянного магнита: (а) фиксированного [2]; (б) перемещаемого с помощью винта [3]

Альтернативным решением указанной задачи является создание внутреннего источника магнитного смещения в самой функциональной среде. Это может достигаться за счёт введение в планарную среду дополнительных слоистых элементов, выполняющих роль стабилизатора магнитного состояния основной части среды, несущей магнитосопротивление. Эффект магнитного смещения достигается, если материалом такого дополнительного элемента служит антиферромагнетик [4] или магнитотвёрдое вещество [5, 6], и этот слоистый элемент находится в обменной связи с магниторезистивной составляющей плёночной среды. В результате аналоговые сенсоры обладают безгистерезисной нечётной и линейной функцией преобразования, связывающей полезный сигнал с измеряемым магнитным полем. В качестве примера на рисунке 1.3 приведена характеристика такого магниторезистивного датчика, выпускаемого компанией Honeywell [7].

АМС-датчики могут быть использованы для решения различных задач магнитометрии, определения курса объекта по магнитному полю Земли, измерения бесконтактным способом угла поворота и линейного перемещения, детектирования скорости объекта, распознавания образа ферромагнитных объектов и работы в составе датчиков тока с гальванической развязкой [2].

Именно высокая чувствительность АМС-датчиков обусловила использование их в качестве чувствительного элемента миниатюрных электронных компасов, так как магнитное поле Земли, которое может быть представлено как поле магнитного диполя (рисунок 1.4), имеет небольшую величину ($\sim 0,5$ Э). Электронные компасы широко применяются в геодезии и системах навигации, как в качестве самостоятельных приборов, так и в составе более сложных систем (например, интегрированных навигационных систем на базе глобальной системы позиционирования – GPS). Преимущество электронных компасов перед традиционными заключается в отсутствии подвижных частей и, как следствие, высокой вибро- и ударопрочности, низкой инерционности, а также простоте интеграции с другим электронным оборудованием.

В работе [8] представлена разработка портативного электронного магнитного компаса для применения в геодезии. Отличительной чертой данного варианта компаса является отсутствие необходимости в горизонтальной установке прибора, т. е. корректное определение азимута при наличии наклонов относительно горизонта. Для построения датчиков курса по магнитному полю Земли в автомобильных, морских и авиационных приложениях применяют комбинацию из трех чувствительных элементов (трёхосевые сенсоры). Принцип действия основан на измерении горизонтальных составляющих поля Земли и определения угла наклона транспортного средства [9,10].

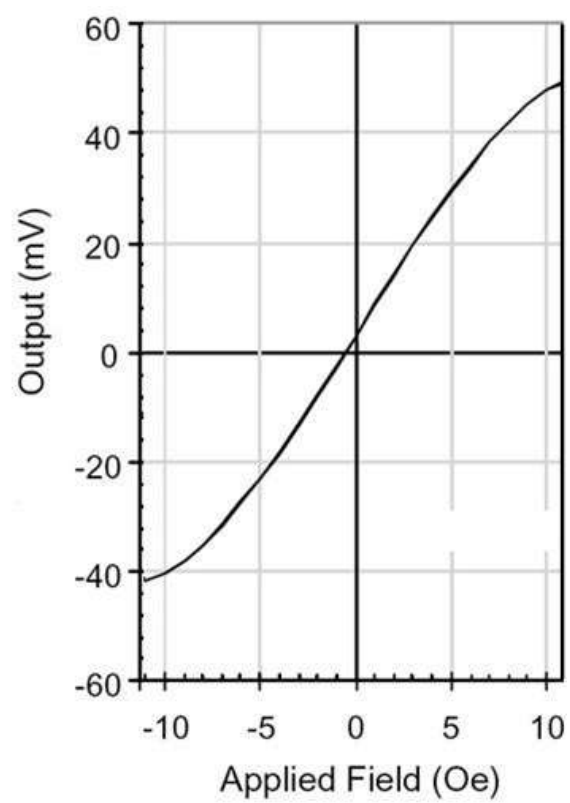


Рисунок 1.3 – Функция преобразования АМС-датчика, выпускаемого компанией Honeywell [7]

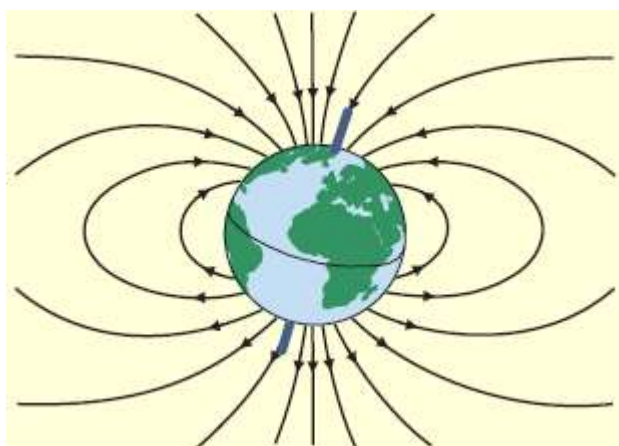


Рисунок 1.4 – Силовые линии магнитного поля Земли [8]

Наличие земного магнитного поля позволяет активно использовать магнитные датчики в контроле над такой важнейшей стороной жизни общества как транспорт. На рисунке 1.5 схематично показано искажение силовых линий земного магнитного поля вблизи автомобиля, содержащего ферромагнитные детали. Датчик, расположенный вблизи транспортного средства, должен реагировать на это изменение плотности магнитного потока, интенсивность которого уменьшается по экспоненте с ростом расстояния (рисунок 1.6). Поэтому детектирующее устройство должно обладать высокой чувствительностью, которой в полной мере обладают АМС-датчики. Устройства на их основе позволяют отслеживать скорость движения автомобилей, направление движения, открытие/закрытие дверей при приближении/удалении автомобиля, контролировать количество мест и свободной площади на парковках [12,13]. В качестве примера на рисунке 1.7 показан принцип определения направления движения автомобиля. Подобные устройства нашли применение и на железнодорожном транспорте [14].

Кроме детектирования крупных ферромагнитных объектов АМС-датчики широко используются для сканирования малых ферромагнитных объектов типа зубьев шестерен, а также определения углового и линейного положения объекта [15]. В данном случае отслеживаемая цель должна быть снабжена постоянным магнитом, создающим детектируемое магнитное поле (рисунок 1.8). Такие датчики широко используются сегодня, например, в автомобильной промышленности (датчики положения дроссельной заслонки, коленчатого и распределительного валов, электромагнитный усилитель руля, электронная педаль газа, система АБС и т.п.). Пример использования АМС-датчиков в рулевом механизме показан на рисунке 1.9.

Современные бесконтактные датчики тока с гальванической развязкой также основаны на АСМ чувствительном элементе (рисунок 1.10). Магнитные датчики постоянно завоёвывают новые области применения [16]. Несмотря на рост конкуренции в последние годы со стороны датчиков, основанных на эффекте гигантского магнитосопротивления [12], АМС-датчики остаются востребованы благодаря высокой чувствительности, относительно простого процесса изготовления и низкой стоимости [11].

1.1.2 Использование эффекта гигантского магнитного импеданса в плёночных ферромагнитных средах для детектирования магнитного поля

Явление магнитного импеданса состоит в изменении комплексного сопротивления ферромагнитного проводника $Z(\omega)$ при протекании через него переменного

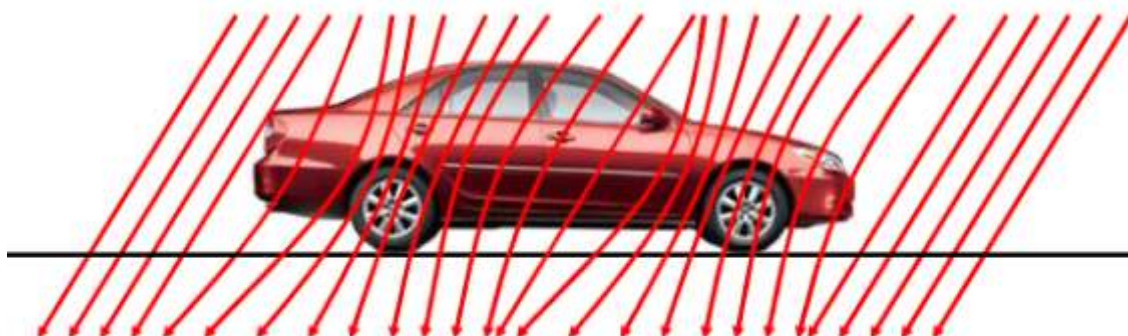


Рисунок 1.5 – Искажение силовых линий магнитного поля Земли вблизи автомобиля [7]

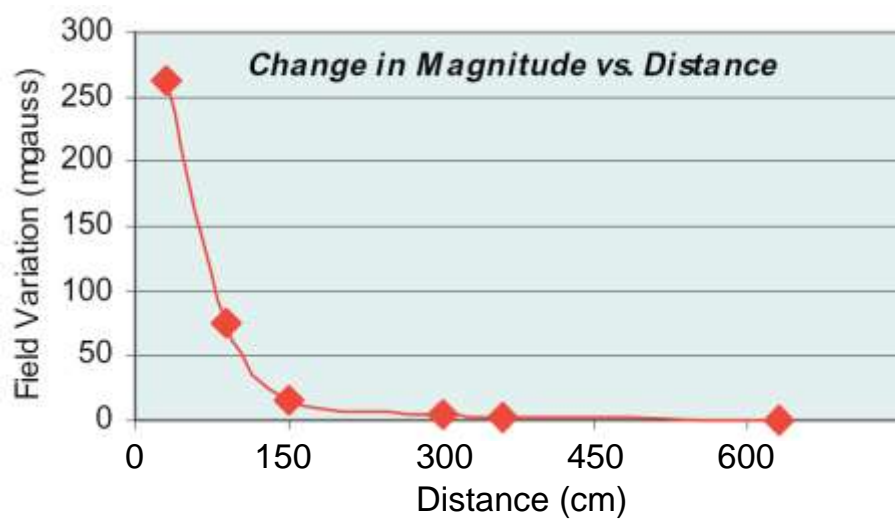


Рисунок 1.6 – Зависимость величины магнитного потока от расстояния между автомобилем и датчиком [11]

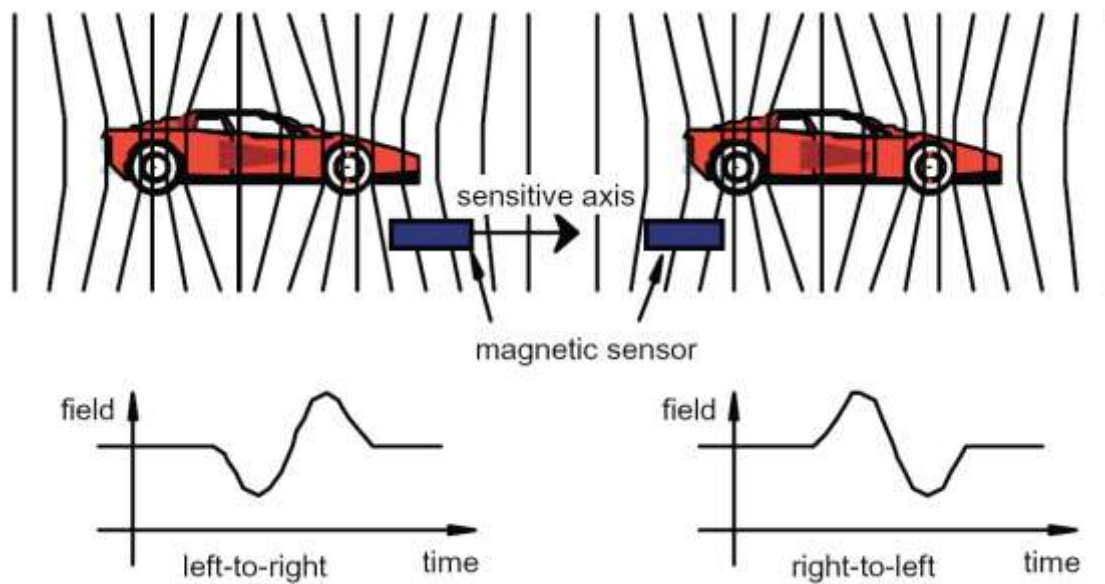


Рисунок 1.7 – Схема, иллюстрирующая способ определения направления движения автомобиля [11]

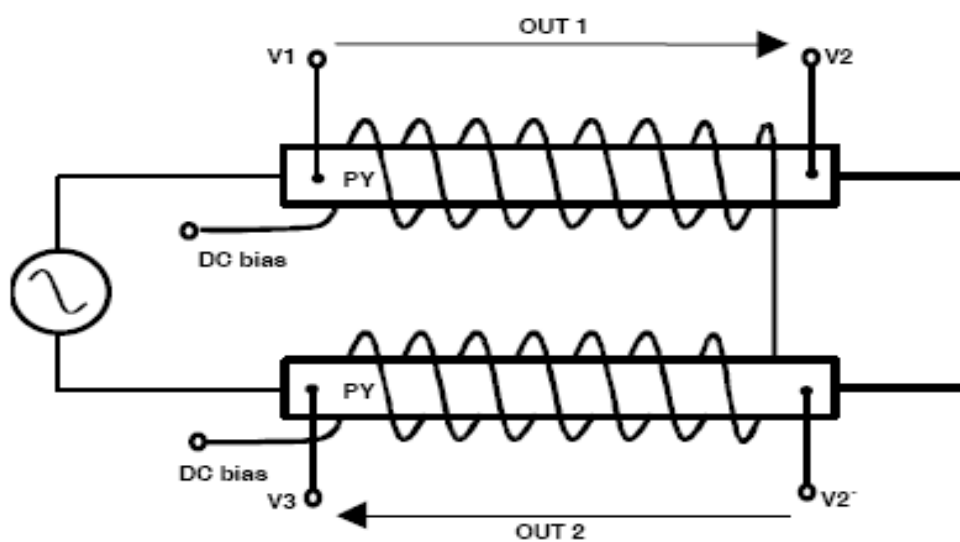


Рисунок 1.8 – Схема ГМИ датчика

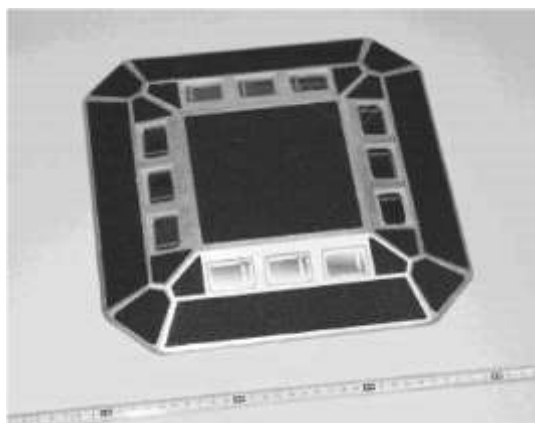


Рисунок 1.9 – Дорожный маркер для детектирования проезжающих транспортных средств

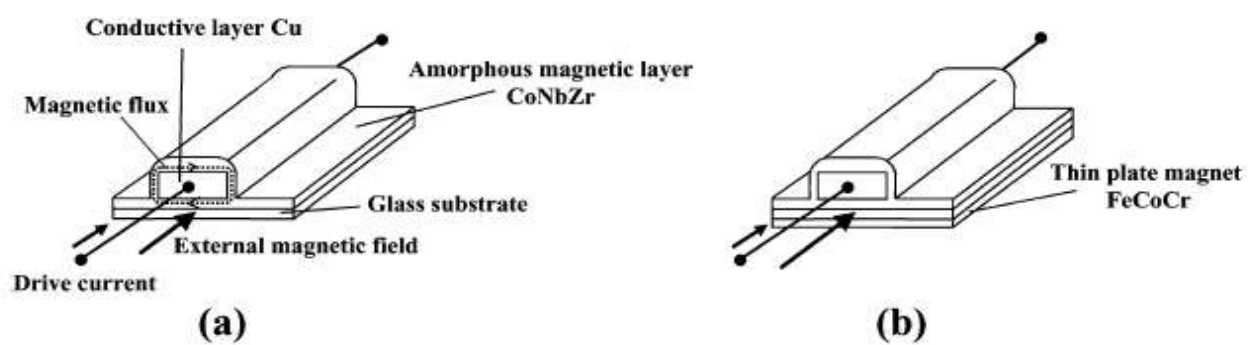


Рисунок 1.10 – Тонкопленочный МИ элемент: а – МИ элемент без подмагничивания, б – улучшенный вариант МИ элемента с тонкопленочным магнитом

возбуждающего тока высокой угловой частоты ω в условиях приложения внешнего постоянного поля (H). Величина магнитного импеданса зависит от свойств материала, параметров тока возбуждения и от размеров проводника. Согласно существующим представлениям о механизмах ГМИ, этот эффект должен наблюдаться в условиях сильного скин-эффекта, когда характерный размер образца сопоставим с глубиной скин-слоя. В 1991 году В.Е. Махоткин с соавторами создали высокочувствительный датчик малых магнитных полей с чувствительным элементом в виде аморфной ленты FeCoSiB, который работал на принципе изменения импеданса под воздействием внешнего магнитного поля [1]. Однако геометрия пленочных структур является более прогрессивной по отношению к технологиям получения быстрозакалённых лент или магнитных проволок. Она более органично вписывается в общую схему полупроводниковой электроники. Считается, что только пленочные технологии при определённых условиях смогут стать основой широкого внедрения датчиков, функционирующих на основе ГМИ-эффекта, в сферу магнитометрии.

Одной из сфер применения датчиков на основе эффекта ГМИ является неразрушающий магнитный контроль (НМК). Примером эффективного использования ГМИ-датчиков в НМК служат работы групп проф. А.К. Арай и Т. Накай [18–19]. Приведенная в работе [18] полевая зависимость импеданса чувствительного МИ элемента представляет собой отклик типа «двойной пик» с максимумом $Z(H)$ вблизи полей ± 5 Э и очень высокой чувствительностью импеданса около 30 %/Э к внешнему магнитному полю в области полей $2 < |H| < 3$ Э. Появление резкого скачка на импедансной кривой связывается с возникновением или исчезновением наклонных магнитных доменов. Измерение магнитного импеданса проводится с помощью сетевого анализатора HP4396B с использованием коэффициентов отражения. Магнитное поле, в котором появляется скачкообразное изменение импеданса, является практически постоянным (среднее квадратичное отклонение порядка 0,01 Э) и содержит информацию о внешнем подмагничивающем поле, приложенном в плоскости пленки параллельно ее длинной стороне.

Для получения чувствительности датчика магнитного поля порядка $\text{нТ/Гц}^{1/2}$ использовалась дифференциальная схема (рисунок 1.8) с применением переменного подмагничивающего поля, частота которого находилась в кГц диапазоне. Дифференциальная схема применялась для того, чтобы превратить управляющую схему в цифровую логическую на основе использования импульсов, которые по времени совпадали со скачками импеданса. Использование переменного подмагничивающего поля приводило к повышению точности измерений, так как эта процедура фактически означала

усреднение нескольких измерений. Безгистерезисный линейный отклик (с точностью порядка 0,5% в интервале ± 1 Э) пленочного детектора при разрешении в $4,6 \times 10^{-3}$ Э был получен при использовании узкополосного фильтра на выходе с временной константой в 20 Гц. Полученные чувствительность и разрешение в использованном интервале полей позволили использовать CoNbZn пленочный элемент в сложном НМК устройстве.

Детектирование проезжающих транспортных средств с использованием дорожного маркера с встроенным пленочным МИ элементом и источником питания описывается в работе [20]. В последнее время при исследованиях, связанных с транспортными средствами, особое внимание стало уделяться интеллигентным системам транспортировки (ITS). Программа «Автоматическая система скоростных магистралей (AHS)» отражает лучшее, что несут в себе многие ITS программы, в ее задачи входит полная автоматизация процесса управления на дороге с применением соответствующих спецсредств [21–22]. В этой системе магниты (называемые магнитными гвоздями) располагаются на поверхности дороги и высокочувствительные датчики магнитного поля устанавливаются под передним бампером. Автоматическое управление с боковым контролем транспортного средства, может быть достигнут с помощью детектирования магнитного поля этих гвоздей при дальнейшем использовании дорожной управляющей системы, основанной на системе связи типа дорога – транспортное средство для того, чтобы предотвратить его отклонение от центра дороги.

Магнитные датчики многообещающи для детектирования транспортных средств, так как они менее чувствительны к влиянию окружающей среды (дождю, снегу, смогу), чем другие системы, такие как оптические, ультразвуковые или инфракрасные детекторы. Мы предлагаем технику детектирования транспортных средств с использованием коммерческих дорожных маркеров с встроенными датчиками магнитного поля, расположенными на поверхности дороги. Основной принцип такой техники основан на детектировании малых магнитных полей, которые присутствуют вокруг подмагниченных транспортных средств, когда они проходят над или вблизи дорожного маркера. МИ датчики характеризуются высокой чувствительностью и низким энергопотреблением [22–24], при сравнении с другими типами датчиков, например с флюксгейт-детекторами. Эта техника не требует использования специального оборудования – полюсов, ворот — и специальных сооружений необходимых для оптических, ультразвуковых или инфракрасного слежения, так как МИ датчик может быть встроен в коммерческий дорожный маркер. Поэтому его использование считается и простым, и дешевым. МИ оборудование проще установить, оно надежно, не подвержено влиянию окружающей среды, более дешево, чем техники, требующие установки индуктивных контуров, или

пьезоэлектрических датчиков с проводами, так как дорожные маркеры более практичны в реальных дорожных условиях.

Уже сообщалось, что обнаружение транспортного средства с помощью датчика, имеющего МИ элемент в виде аморфной проволоки в экспериментальных условиях, приближенных к реальным условиям на дороге, оказалось более эффективным [25]. Однако, авторы работы [20] создали систему обнаружения транспортных средств, с использованием пленочного МИ элемента, которая превосходит систему на основе МИ элемента в виде аморфной проволоки будучи более дешевой, так как пленочные элементы дешевы, технология их получения воспроизводима, высокопродуктивна, совместима с интегральными схемами на основе кремния. На рисунке 1.9 приведена фотография дорожного маркера на алюминиевой пластине. Дорожные маркеры (ДМ) характеризуются беспроводным управлением и возможностью сохранять информацию из-за наличия собственных источников питания. ДМ – это 30 см квадрат толщиной в 25 мм. Солнечные батареи закреплены на поверхности ДМ. ДМ включал: тонкопленочный МИ элемент, чувствительный к малым магнитным полям, аналоговую схему для управления МИ элементами и обработки полученных ими данных, цифровую схему, способную сохранять информацию и источник питания с вторичной батареей.

Рисунок 1.10, *a* показывает принципиальную схему тонкопленочного МИ элемента. Он имеет многослойную структуру с проводящей центральной медной жилой (толщина 3 мкм), окруженной аморфными ферромагнитными CoNbZn пленками (толщина каждой 2 мкм). Поперечная магнитная анизотропия пленок CoNbZn была создана в процессе магнетронного распыления в постоянном магнитном поле. МИ элемент имел размер 5×5 мм и представлял собой меандр с 2 поворотами. МИ элемент прошел отжиг в магнитном поле. Величиной в 2 кГс (0,2 Т) при температуре 400 °С в атмосфере аргона для увеличения устойчивости при комнатной температуре. Импеданс МИ элемента сильно зависел от величины внешнего магнитного поля, приложенного в продольном направлении. Кривая была безгистерезисной. МИ характеристики хорошо объяснялись на основе изменения поперечной магнитной проницаемости магнитной тонкой пленки при использовании модели перемагничивания вращением. Важно сместить рабочую точку до оптимизированной величины поля, чтобы обеспечить хорошую температурную стабильность и линейность (рисунок 1.11). Поэтому тонкопленочный FeCoCr магнит прикрепили к обратной стороне МИ элемента, чтобы обеспечить 25 Э поле смещения. Толщина FeCoCr магнита составляла 50 мкм. Хорошая линейность наблюдается в интервале полей от + 0.7 до – 0.7 Эрстед при отсутствии гистерезиса. Даже в интервале

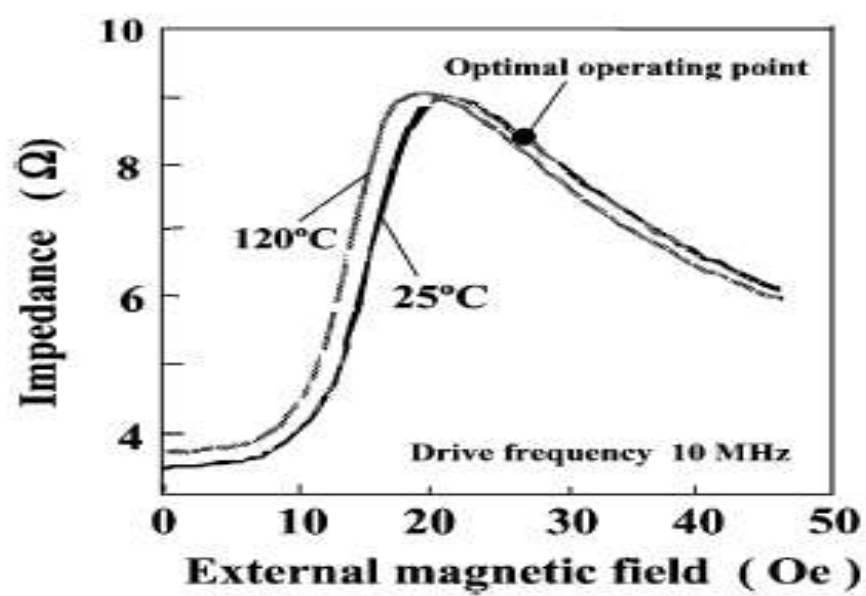


Рисунок 1.11 – Импедансные характеристики основного МИ элемента во внешнем магнитном поле

температур от 0 до 75 °C импедансные характеристики изменялись на более. Чем на 5 % FS (FS: 1,4 Э).

Два МИ элемента использовали в полумостовой схеме (рисунок 1.12). Элементы подмагничивались тонкопленочными магнитами, создающими поля взаимнопротивоположной ориентации. Поэтому, изменения направлений в детектируемых сигналах были тоже противоположны. Выходной сигнал импульса в каждом узле полумоста конвертировался в постоянное падение напряжения через схему, отвечающую за пик, с использованием диодов, узкополосных фильтров при дальнейшем усилении с помощью дифференциального усилителя. Диод Шотки характеристикой малого возвратного падения напряжения использовался в схеме, отвечающей за форму пика.

Для дальнейшего совершенствования измерительной схемы было предложено использовать беспроводной датчик магнитного поля, использующий поверхностные акустические волны [26]. Новый беспроводной запрашиваемый детектор магнитного поля можно создать, используя ГМИ датчик и поверхностные акустические волны (SAW). Основным элементом данных компонент датчика — SAW delay line — линия запаздывания, соединенная с антенной. Второй вход играет роль настраиваемого отражателя для SAW. Степень его акустического отражения зависит от электрического окончания. Если использовать последовательно подсоединенную резонансную схему с ГМИ устройством, изменение импеданса ГМИ элемента из-за изменения магнитного поля, то можно получить достаточный эффект для радиосчитывания. Датчик играет роль пассивного элемента без источника питания или полупроводниковых элементов и может быть использован в очень жестких условиях окружающей среды с высоким уровнем загрязнения пылью, высокой температурой (до сотен градусов Цельсия), интерференциями, вызванными присутствием электромагнитных полей, механическими нагрузками, которые приводят к разрушению датчиков других типов.

Новый подход — использование линий запаздывания с 2 входами (рисунок 1.13). Один вход — внешний цифровой преобразователь (IDT1) — соединен с антенной, а другой (IDT2) нагружается активной или пассивной схемой. IDT — это устройство с 3 входами и одним электрическим входом с падением напряжения u и током I ; 2 акустических порта с получаемыми волнами a_1 a_2 и излучаемыми b_1 b_2 . Акустическое отражение P_{11} IDT 2 как функция импеданса Z_{load} у электрического входа связаны уравнением (1) в известном формализме Р-матриц [27–29].

Как видно из примеров МИ детектирования, все характерные геометрии МИ элементов были успешно опробованы в ряде специализированных детекторов магнитного

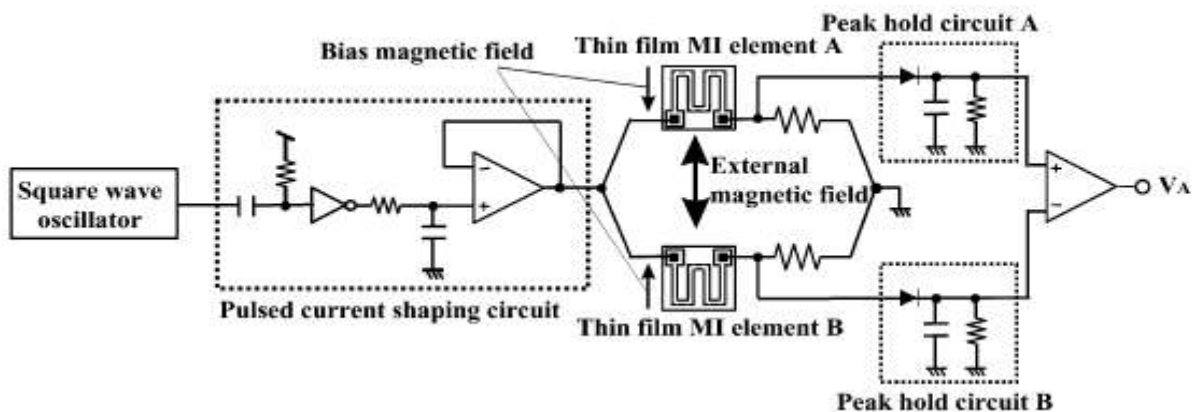


Рисунок 1.12 – Схема управления/обработки данных для тонкопленочного МИ элемента

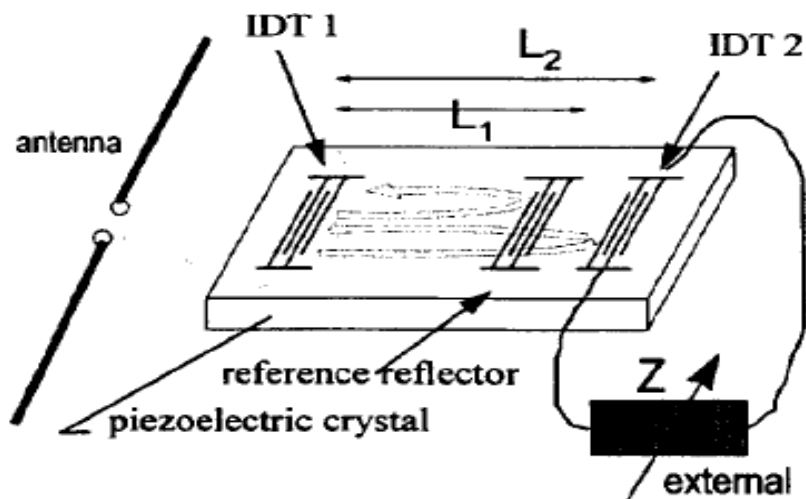


Рисунок 1.13 – Описание пассивного SAW устройства, связанного с внешним датчиком классического» типа

поля. Полученные разрешение и чувствительность к внешнему магнитному полю в сочетании с температурной стабильностью и удобным интервалом полей детектирования в ряде случаев превышали характеристики детекторов других типов. Возможность использования/относительно простой адаптации стандартных сканирующих систем и компьютерных программ, разработанных для детектирования с помощью датчиков магнитного поля других типов, безусловно, играет свою положительную роль. Однако, следует специально уточнить, что в МИ детектировании сделаны лишь первые шаги, показана потенциальная возможность его использования. Особого внимания требует моделирование, а именно существует необходимость создания особых моделей, которые описывали бы поведение динамической магнитной проницаемости.

1.2 Разработка конструкции датчика тока на основе АМС-сенсоров

Одним из эффективных применений сенсоров магнитного поля, использующих АМР-эффект, являются датчики тока, в которых отсутствует электрическая связь между электросиловой и измерительной цепями. Разработка оптимальной конструкции датчика тока, предназначенного для работы в составе электросчётчика, выполнена в рамках данного проекта на производственной базе ФГУП «НПО автоматики» (НПОА).

1.2.1 Совершенствование конструкции магнитных сенсоров

Использование АМР-сенсоров в аналоговых измерительных устройствах, к которым относится датчик тока, накладывает достаточно жёсткие ограничения на характеристики самого сенсора и, в частности, на отношение сигнал/шум. Для улучшения этого параметра была проведена работа по модернизации топологии магниторезистивного сенсора в рамках ранее созданной схемы четырёхплечевого моста и структуры плеч моста в форме наклонных меандров. В качестве базового сопротивления магниторезистора было принято значение 2.3 кОм, что позволяет получать относительно высокий сигнал при низком уровне тока питания моста. Кроме того, изготовлены мосты с сопротивлением 4.5 кОм. Увеличение сопротивления достигнуто за счет увеличения длины полоски в меандре с сохранением неизменными ее ширины и зазора между полосками (15 и 1.5 мкм соответственно). Такое изменение позволило бы получить больший выходной сигнал без увеличения тока питания моста, что имеет существенное значение для, например, устройств учета электроэнергии.

Анизотропный магниторезистивный эффект состоит в зависимости сопротивления чувствительного элемента от угла между намагниченностью и электрическим током. Поэтому целесообразно исключить (шунтировать) те области меандра, в которых ток отклоняется от оптимального направления и которые фактически являются балластными для моста, снижая эффективность его работы. Кроме того, острые углы в топологии плеча моста могут быть местами локализации магнитных неоднородностей (магнитных доменов), изменение объёма которых в магнитном поле приводит к гистерезису рабочей характеристики. Изгибы меандров целесообразно шунтировать низкоомными немагнитными аппликациями. Вариант таких аппликаций показан на рисунке 1.14. Был произведен расчет распределения тока в меандре в отсутствии и присутствии низкоомной аппликацией. Шунтирование осуществлено слоем хром-медь-хром, который напыляется для формирования разводки.

На рисунке 1.14,*а* показано распределение тока без аппликаций, на рисунке 1.14,*б* низкоомными аппликациями. На обоих рисунках для удобства показана зона расположения аппликации. Видно, что аппликация выравнивает плотность и подавляет угловую дисперсию тока в полоске меандра. Аппликация не может занимать всю ширину полоски меандра, поскольку при совмещении фотолитографического шаблона слоя аппликаций может произойти замыкание аппликацией соседних полосок меандра. Отступ от края составляет 1.5 мкм. Такое различие в размерах практически не нарушает углового распределения тока в полоске чувствительного слоя.

На рисунке 1.15 приведена топология основного кристалла (ДТ-1) для датчика тока. Расстояние между центрами пар меандров (база градиометра) составляет 2.5 мм. Расчетное сопротивление моста составляет 4.6 кОм при поверхностном сопротивлении чувствительного слоя 5.5 Ом/квadrat. Размер кристалла 2.8×3.0 мм. Кристалл имеет шунтирующие аппликации. В модуль мультипликации входят шесть вариантов топологии, включая ДТ-1. Модуль показан на рисунке 1.16. Модуль ДТ2 отличается от модуля ДТ1 отсутствием низкоомных аппликаций. Данный вариант топологический вариант был создан с целью проверки оправданности ввода нового элемента – шунтирующих аппликаций, поскольку они усложняют технологический процесс формирования кристалла.

Модули ДТ3 и ДТ4 представляют собой магниторезистивные мосты собранные по схеме градиометра поля. Расстояние между полумостами (база градиометра) – 1.5 мм. Модуль ДТ4 имеет сопротивление плеча моста 4.6 кОм, ДТ3 – 2.3 кОм. Оба модуля имеют низкоомные аппликации. Модуль ДТ5 представляет собой два независимых полумоста, позволяющих внешней коммутацией собрать либо датчик поля, либо

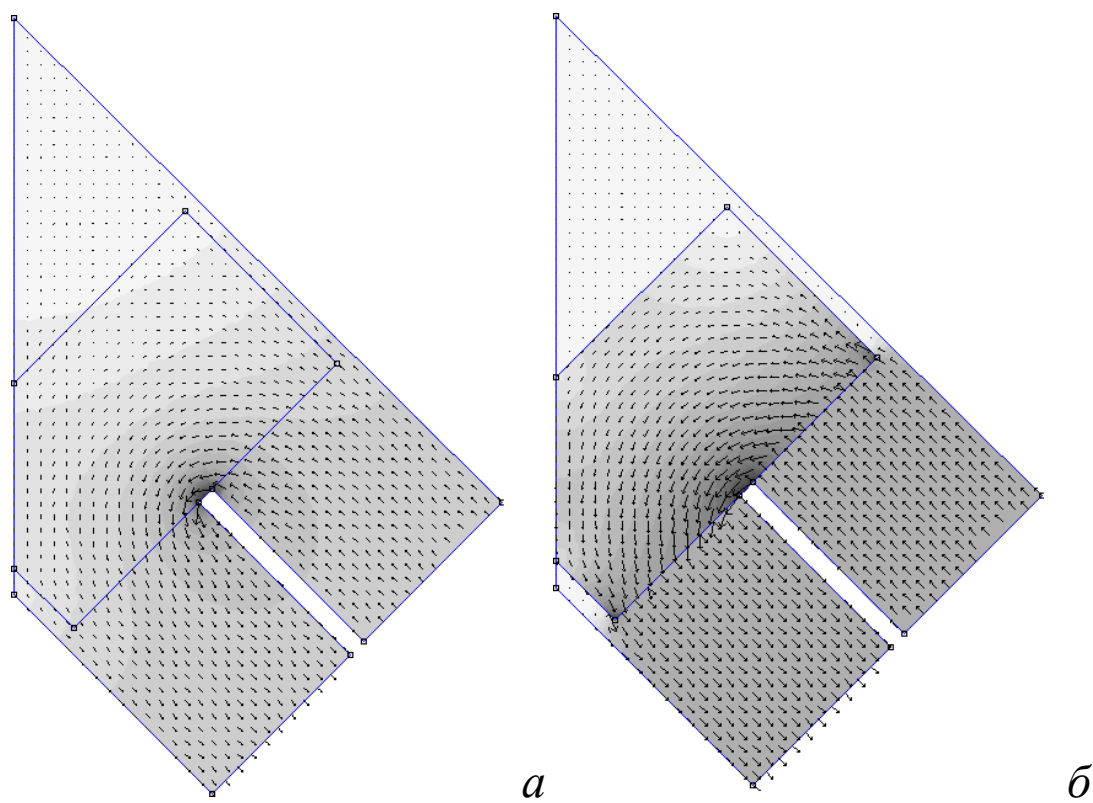


Рисунок 1.14 – Схемы распределения плотности тока (стрелки) в изгибе меандра: *a* – в отсутствии аппликации; *б* – при наличии аппликации

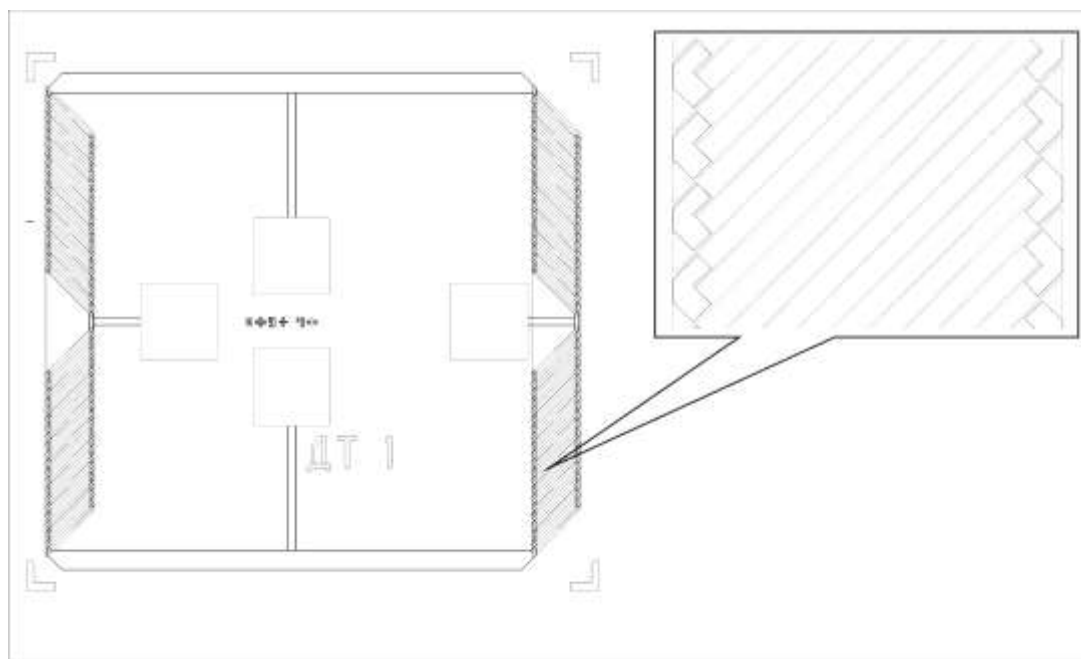


Рисунок 1.15 – Топология основного кристалла (ДТ-1)

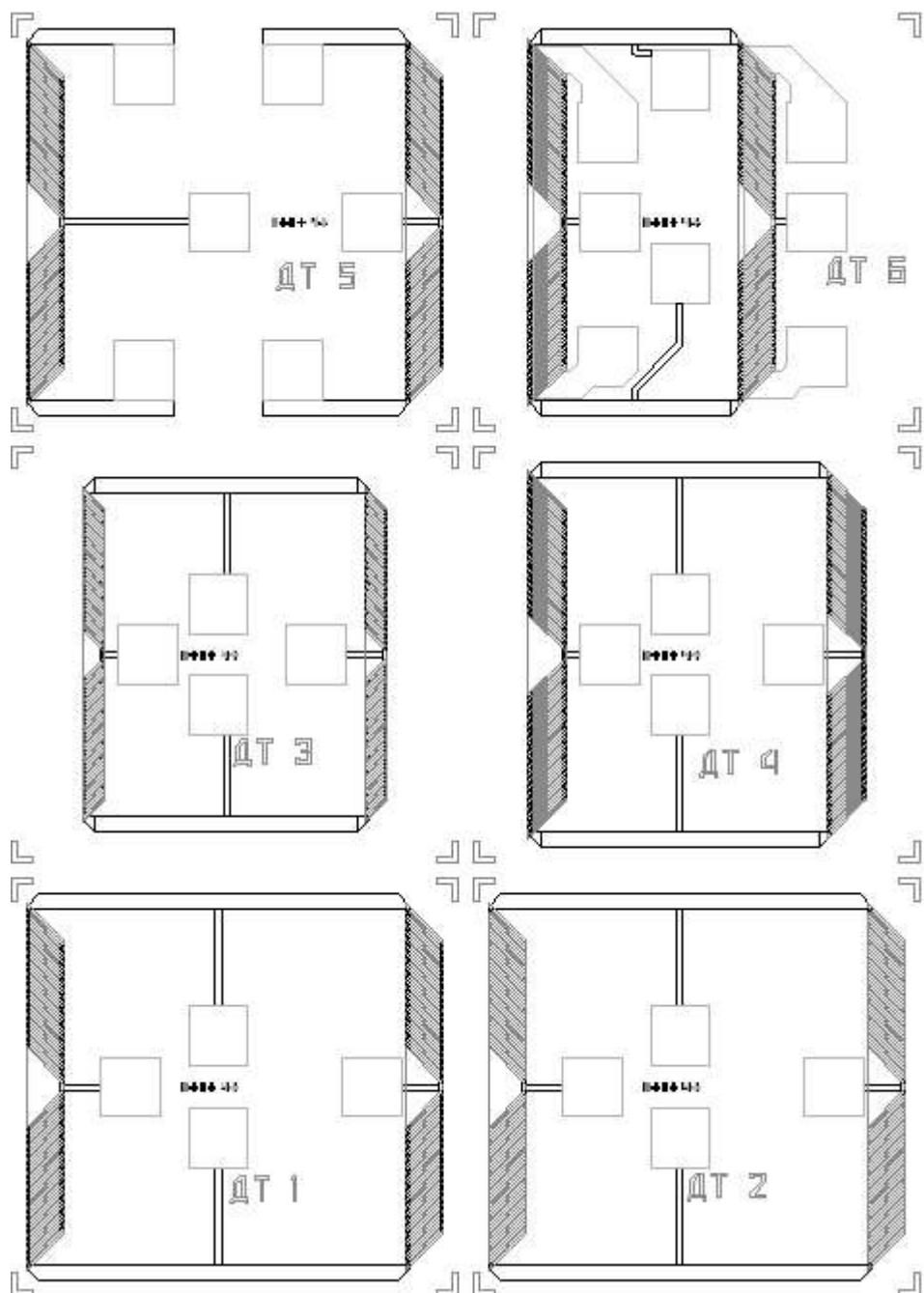


Рисунок 1.16 – Варианты топологии кристалла

градиометр. На такой конструкции можно устанавливать внешние подгоночные резисторы. Расстояние между полумостами (база градиометра) – 2.5 мм. Сопротивление плеча моста 4.6 кОм. Модуль имеет низкоомные аппликации.

Модуль ДТ6 представляет собой магниторезистивный мост собранный по схеме градиометра поля. Расстояние между полумостами (база градиометра) – 1.5 мм. Над каждым полумостом сформировано по алюминиевой шине. Сопротивление последовательно включенных шин без учета перемычек 0,78 Ом (26 квадратов). Ширина шины 180 мкм и при толщине 1 мкм она допускает ток 180 мА (порядка 6 эрстед на чувствительных меандрах). Шины можно использовать в качестве источника поля измеряемого тока, для организации измерения методом нуль индикатора, для создания постоянной магнитной предыстории перед каждым актом измерения тока (снижение гистерезиса). Модуль имеет низкоомные аппликации.

При изготовлении кристаллов в качестве исходных структур были использованы окисленные пластины монокристаллического кремния 60КЭФ 4,5 (100) (кремний электронный, легированный фосфором, объемным сопротивлением 4,5 Ом*см, кристаллографическое направление поверхности 100, диаметр пластины 60 мм). Окисление поверхности кремния проводилось в цехе микроэлектроники НПОА. Далее пластины передавались в УрФУ, где методом магнетронного распыления наносился магниточувствительный слой. После этого пластины поступали вновь в цех микроэлектроники, где методами фотолитографии и вакуумного напыления формировались магниточувствительные элементы, электрические шины и контактные площадки, а также защитный слой. Основные электрические и магнитные характеристики мостовой схемы кристалла контролировались в составе пластины на зондовой установке, по результатам проверки отмечались бракованные кристаллы. Далее пластина разделялась на кристаллы и, после визуального контроля поступала на сборочные операции. В зависимости от назначения кристаллы монтировались либо на печатную плату-носитель (сенсоры магнитного поля) либо в конструкцию датчика магнитного поля. После этого методом термокомпрессионной сварки микропроволокой контактные площадки кристалла соединялись с токоведущими дорожками печатной платы, на кристалл и выводы наносился защитный слой компаунда. После этого можно было проводить измерения электрических и электрофизических характеристик.

1.2.2 Разработка конструкции датчика тока

Для конструирования датчика тока был использован чувствительный элемент, работающий как градиометр магнитного поля. Для этого на чувствительном кристалле пары плеч мостовой схемы разнесены на расстояние, достаточное для регистрации градиента поля создаваемого измеряемым электрическим током. Ток пропускается через петлеобразную токовую шину. В результате в области чувствительного элемента возникает градиент магнитного поля. Принцип действия такого первичного преобразователя иллюстрирует рисунок 1.17. Пары плеч R1-R2 и R3-R4 идентичны, и при воздействии на них внешнего однородного магнитного поля их сопротивление изменяется одинаково, не вызывая отклонения выходного напряжения от начального значения. Поле же, вызванное измеряемым током, имеет разную полярность для пар плеч R1-R2 и R3-R4 и приводит к изменению выходного напряжения. Таким образом происходит селекция полезного сигнала, вызванного локальной шиной, от влияния внешних однородных магнитных полей и полей от удаленных локальных источников. Реализация данного принципа на одном кристалле снимает проблемы неточной установки разных кристаллов, а также приводит к максимальной идентичности пар плеч по характеристикам, в том числе и при изменении температуры окружающей среды. На одном кристалле можно выбрать оптимально минимальную базу градиометра. Все вышеперечисленное приводит к максимально эффективному подавлению влияния паразитных магнитных полей.

Ввиду необходимости усиления слабых выходных сигналов чувствительных преобразователей магнитного поля и снижения уровня помех, вызванных длинными проводами связи между чувствительными элементами и схемой усиления, была разработана новая топология электронного блока для испытаний сенсора. Эта же конструкция предполагается базовой для датчика тока электронных счетчиков электроэнергии. Основное отличие состоит в том, что кристалл чувствительного преобразователя монтируется непосредственно на плату с усилительным трактом. Такое решение приводит к минимизации длины и неизменности геометрии электрических связей между чувствительным элементом и остальной схемой. В данной ситуации снижается температурный градиент между чувствительным элементом и схемой обработки, что упрощает термокомпенсацию датчика в целом. Кроме того, предусмотрен специальный канал усиления для передачи информации о температуре чувствительного кристалла по сопротивлению моста или специальной структуры в чувствительном слое, чье сопротивление не зависит от присутствующего магнитного поля.

Основной канал усиления является дифференциальным как по входу, так и по выходу. Такое схемное решение, в отличие от стандартного инструментального усилителя имеет заметно меньшую собственную зависимость от температуры окружающей среды. Это особенно важно при широком диапазоне входных напряжений и вынужденной работе датчика вблизи нуля по полезному сигналу. В качестве операционного усилителя были выбрана микросхема TLE2022. Она отличается хорошими шумовыми и частотными характеристиками. Кроме того, схема имеет собственный стабилизатор напряжения на микросхеме REF3125. Такое решение позволяет максимально очистить напряжение питания, в том числе убрать помехи, наводимые на подводящих проводах питания.

Конструктивно электронный блок (рисунок 1.18) представляет собой две стеклотекстолитовые пластинки. Одна пластинка с размерами $29 \times 24 \times 1,5$ мм является печатной платой с односторонним поверхностным монтажом. По центру длинной стороны с краю вырезан сквозной прямоугольник размером 3×4 мм, для установки чувствительного кристалла. Вторая нефольгированная пластина размерами $29 \times 21 \times 0,5$ мм приклеивается к печатной плате с обратной, свободной от монтажа, стороны и служит двум целям. Во-первых, формируется плоскость для установки кристалла в вырез печатной платы. Во-вторых, она обеспечивает гальваническую развязку между электроникой датчика и шиной с измеряемым током.

1.2.3 Результаты испытаний магнитного сенсора и датчика тока

Для проведения испытаний сенсора и датчика были разработаны соответствующие программы и методики, учитывающие особенности эксплуатации приборов и позволяющие оценить основные технические характеристики разработанных изделий. Для испытаний в качестве сенсора магнитного поля были изготовлены кристаллы со стандартной топологией MR-1. В ходе испытаний было установлено, что магниточувствительный кристалл имеет сопротивление около 2 кОм. Зависимость выходного сигнала от измеряемого магнитного поля является нечетной и линейной вблизи нуля. Данный факт подтверждает наличие внутреннего магнитного смещения. На рисунке 1.19 приведена типичная характеристика сенсора. Средняя чувствительность по партии исследованных сенсоров составляет 0.5 мВ/В/Э. При этом нелинейность характеристики в диапазоне $\pm 5\text{Э}$ не более 1 %.

Надо отметить, что в силу технологических особенностей оборудования, на котором синтезировалась магниторезистивная среда с внутренним магнитным смещением (УрФУ) наблюдается заметная неоднородность по характеристикам сенсоров по диаметру

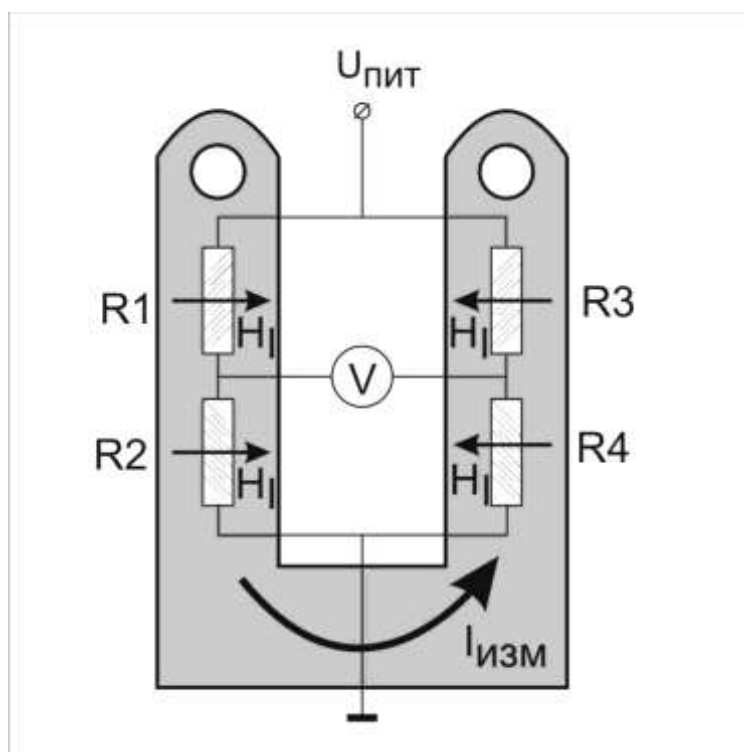


Рисунок 1.17 – Схема сенсорного узла измерителя тока

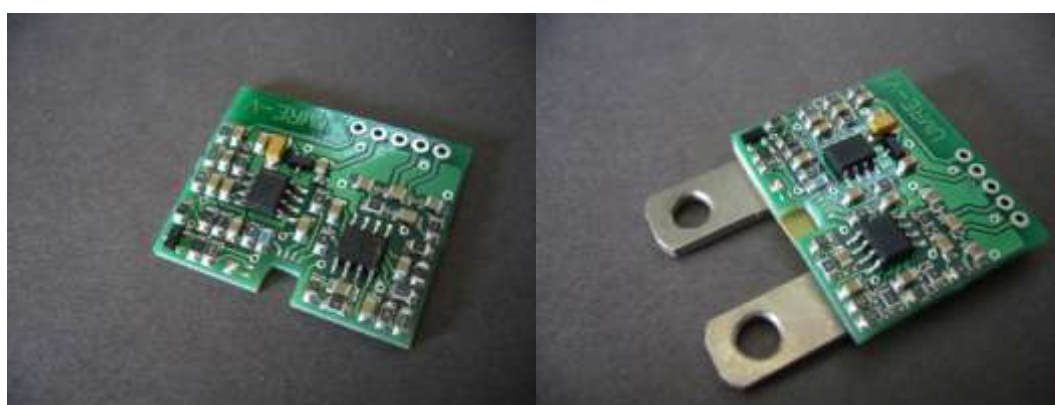


Рисунок 1.18 – Опытный образец датчика тока

пластины. Такая зависимость для чувствительности сенсора показана на рисунке 1.20. В дальнейшем с переходом на серийное оборудование при синтезе чувствительной среды данная зависимость будет минимизирована. И, наконец, была исследована температурная зависимость чувствительности сенсора. Данный параметр также имел определенный разброс в пределах $-(0,2 \dots 0,3) \% / ^\circ\text{C}$. В целом полученные результаты удовлетворяют техническому заданию. Но собственно технология получения чувствительной среды и параметры слоев не доведены до оптимального состояния. И это является сутью дальнейшей работы с данными объектами.

Кроме того, было проведено исследование макета датчика тока на магниторезистивных средах с внутренним магнитным смещением. В качестве объекта для исследования были изготовлены кристаллы с топологией ДТ-1. Было определено, что при питании макета датчика тока напряжением 5 В его собственное потребление не превысило 7 мА. На измерительную шину подавался ток переменный ток до 100 А при частоте 50 Гц. Диапазон выходного сигнала составил 0-2 В. Основная погрешность преобразования опытного образца датчика тока не превысила 0,2 %. Частотный диапазон макета датчика тока достигает 200 кГц. Исследование влияния внешних однородных магнитных полей показало вносимую дополнительную погрешность не более 0.08 %.

1.3 Разработка и испытание мостовой схемы сенсора на основе ГМИ-элементов

Результаты исследований влияния структуры чувствительного слоя и его топологических параметров на величину и качество ГМИ эффекта, выполненные ранее для одиночных меандрах, позволили перейти к разработке мостовой схемы чувствительного элемента. Мостовая схема имеет ряд преимуществ перед одиночным магниточувствительным резистором. В первую очередь она позволяет минимизировать постоянную составляющую в выходном напряжении сенсора. Это приводит к ограничению чувствительности системы только соотношением сигнал/шум, а точнее амплитудой шумов в единицах измеряемой величины. Также при определенной конструкции измерительного моста возможна компенсация влияния температурной зависимости базового сопротивления его плеч.

Существует три возможных реализации классической мостовой схемы Уинстона (рисунок 1.21). Первый вариант (рисунок 1.21, а) подразумевает использование одного магниточувствительного ГМИ-плеча и трех балластных сопротивлений. Такая конфигурация позволяет избавиться от постоянной составляющей выходного напряжения. Однако для неё не реализуется компенсация температурной зависимости базового

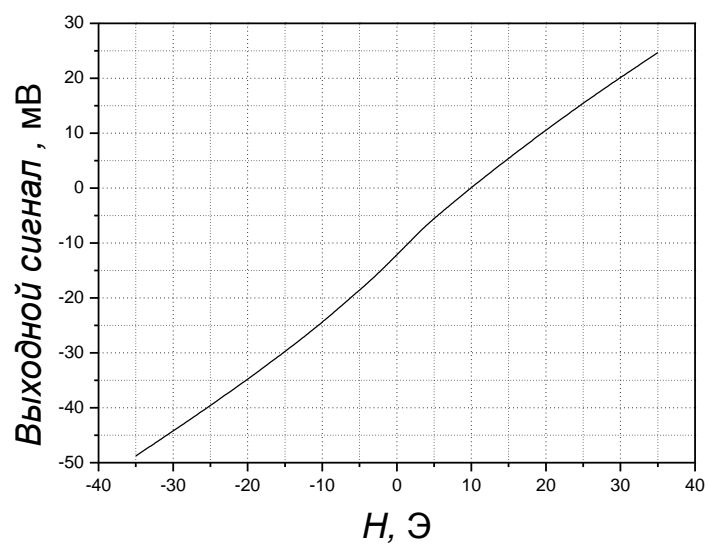


Рисунок 1.19 – Типичная характеристика магниторезистивного сенсора с внутренним магнитным смещением

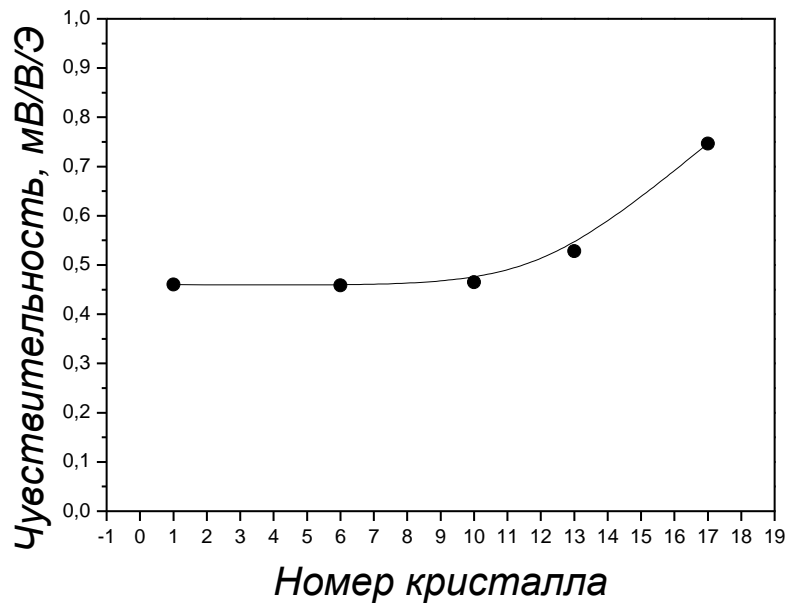


Рисунок 1.20 – Зависимость чувствительности от положения кристалла на пластине относительно реперного модуля

сопротивления плеч моста. В тоже время следует отметить определенное преимущество такой мостовой схемы конкретно в применении к ГМИ эффекту. В силу природы явления магнитного импеданса не удастся получить сколько-нибудь значительное изменение полного сопротивления на миниатюрных элементах, таких, какие используются, например, в магниторезистивных чувствительных элементах. ГМИ-плечо моста имеет относительно большие геометрические размеры (в нашем случае 5×10 мм). В связи с этим мост с более чем одним ГМИ-плечом может давать только усреднённую информацию о неоднородном магнитном поле, и анализ топологии магнитных полей от локальных источников становится практически невозможным.

Второй вариант, включающий пару ГМИ-элементов (рисунок 1.21, б), позволяет увеличить выходной сигнал в два раза. Однако проблема температурной зависимости базового сопротивления плеч остается, и к ней добавляется нежелательное увеличение размеров всего сенсора. Третий вариант мостовой схемы с четырьмя чувствительными элементами (рисунок 1.21, в) имеет хорошую компенсацию температурной зависимости базового сопротивления плеч моста. Кроме того, он позволяет получить четырехкратно усиленный выходной сигнал. Однако для обеспечения работоспособности такого сенсора необходима довольно сложная магнитная система, создающая попарно противоположное магнитное смещение плеч моста. Наконец, ввиду низкого сопротивления плеч моста, сопоставимого с сопротивлением соединительных элементов, исходная балансировка мостовой схемы является нетривиальной задачей.

Приведённые выше рассуждения показывают потенциальные достоинства и недостатки различных способов организации мостовой магниточувствительной схемы на основе ГМИ-элементов. Выбор адекватного варианта, вероятно, возможен только в условиях решения определённой измерительной задачи, конкретизирующей требования к соответствующим сенсорам. На данном этапе, не подразумевающим решение таких задач, для исследования был принят компромиссный вариант схемы. В нём все четыре плеча выполнены из одного материала и имеют одинаковую топологию, а именно, форму прямого меандра (см. рисунок 1.22, а). Однако функциональная роль в данной схеме отводится только двум противоположным плечам, в которых длинные стороны полосок меандров ориентированы вдоль оси приложения измеряемого магнитного поля. Такая возможность возникает из-за анизотропии чувствительности меандров.

Анизотропию свойств меандра иллюстрирует рисунок 1.23. На нём показаны части магнитоимпедансных петель меандра, измеренных в магнитном поле вдоль (кривая 1) и поперёк (кривая 2) длинных сторон полосок шириной 0,2 мм, длиной 5 мм и расстоянием между полосками 0,2 мм. В качестве функциональной величины здесь выбрана активная

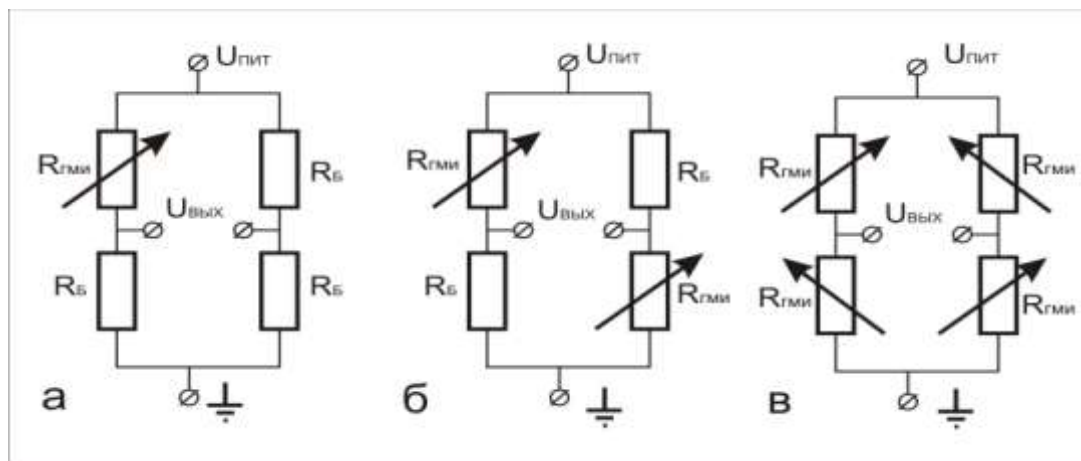


Рисунок 1.21 – Варианты электрического моста Уинстона с разным количеством ГМИ-плеч, которые обозначены как переменные резисторы

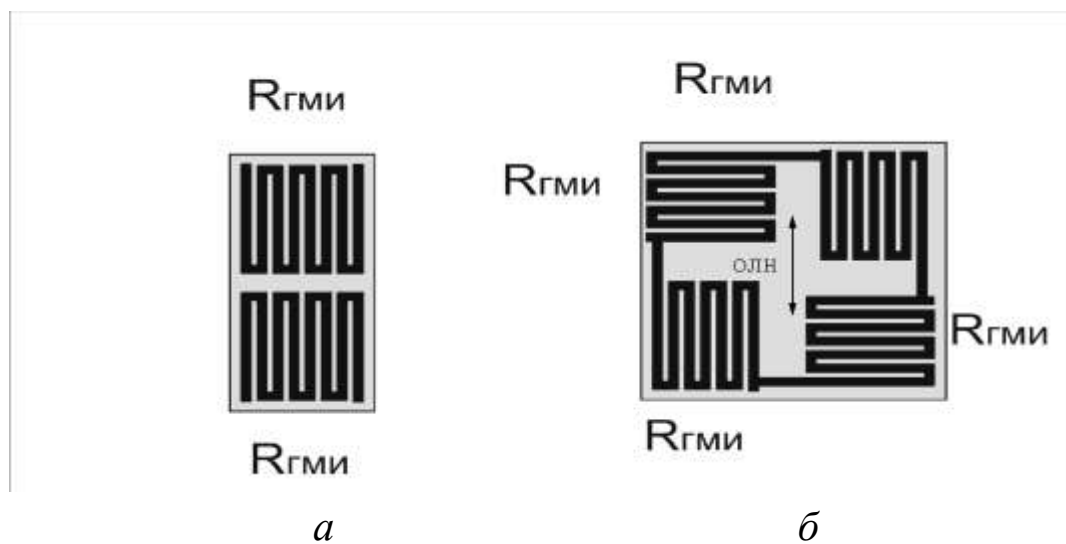


Рисунок 1.22 – Топология одиночных ГМИ-элементов (а) и ГМИ-элементов, объединённых в четырёхплечный мост (б)

составляющая импеданса $\Delta R/R = [R(H) - R(H=100 \text{ Э})] \times 100 \% / R(H=100 \text{ Э})$. Возбуждающий ток, имел эффективное значение 1 мА и частоту 13 МГц. Как видно из рисунка, в одном случае (поле ориентировано вдоль полосок) имеет место сильное изменение величины $\Delta R/R$, а в другом случае (поле ориентировано поперёк полосок) магнитный импеданс практически отсутствует. Это обусловлено тем, что ось лёгкого намагничивания магнитоимпедансной среды ориентирована перпендикулярно длинной стороне полосок. В такой ситуации максимальное полное сопротивление реализуется, когда внешнее поле, прикладываемое перпендикулярно ОЛН, сравнивается с полем магнитной анизотропии, то есть, когда имеет место максимальная циркулярная магнитная проницаемость.

Наличие анизотропии чувствительности позволяет варьировать функциональные свойства плеч моста путем изменения ориентации полосок меандра по отношению к ОЛН. В частности, на рисунке 1.22, б роль активных плеч принадлежит меандрам, расположенным в левом верхнем и правом нижнем углах схемы. При этом получается выходной сигнал в два раза меньший чем в случае, когда «работают» все четыре плеча. Однако в такой структуре существенно упрощается конструкция магнитной системы и топология проводников внутри моста. Такой мост может быть использован для измерения однородного магнитного поля. Однако он малоприспособен для измерения локальных полей, ввиду большой площади (10×10 мм).

Фотографии сборок ГМИ-элементов, полученных в соответствии с разработанной топологией приведены на рисунке 1.24.

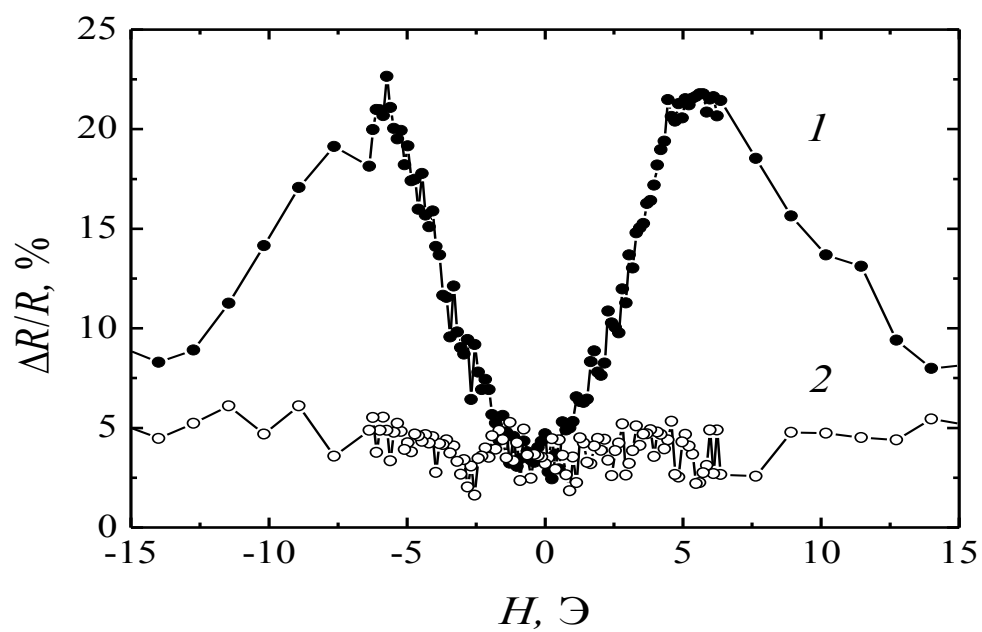


Рисунок 1.23 – Зависимости активной составляющей магнитного импеданса от напряжённости циклически изменяющегося магнитного поля, измеренные поле вдоль (кривая 1) и поперек (кривая 2) полосок

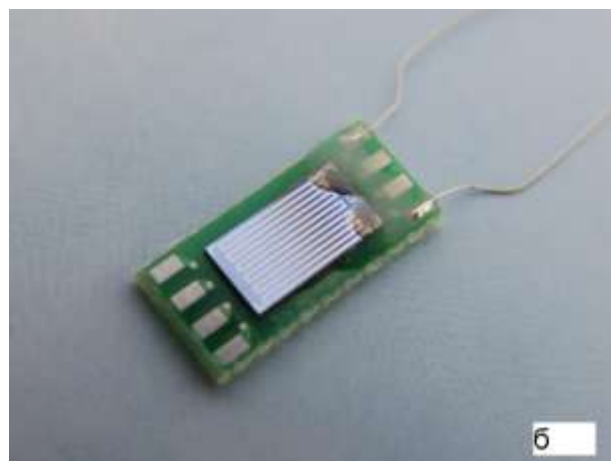
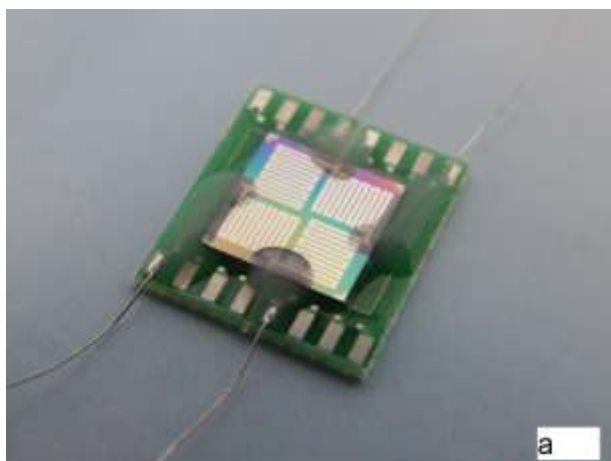


Рисунок 1.24 – Образцы сборок с ГМИ элементами, а – полный мост, б – единичный элемент

2. Испытание опытного образца топливного элемента: снятие вольтамперных характеристик, оценка эффективности работы на полноту сгорания топлива, стабильности работы во времени.

2.1 Сборка измерительной ячейки для испытания единичного топливного элемента

Для проведения испытаний изготовленной на предыдущем этапе работы единичной ячейки, представленной на рисунок 2.1, необходимо создать герметичную измерительную ячейку, в которой анодное и катодное пространства изолированы друг от друга для предотвращения смешивания топлива (водорода) и окислителя (кислорода воздуха). Подготовленные ячейки топливного элемента, представляющие собой таблетки твердого электролита (допированный галлат лантана $\text{La}_{0.88}\text{Sr}_{0.12}\text{Ga}_{0.82}\text{Mg}_{0.18}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGM)) с нанесенными электродами, помещали на керамическую трубку таким образом, что во внутреннем пространстве находится топливный электрод, а с воздушной атмосферой контактирует кислородный электрод (катод) и по краю таблетки наносили смесь из органического связующего и высокотемпературного стекла. В качестве катода использовали кобальтит лантана стронция ($\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_{3-\delta}$ (LSC), либо композит на его основе). В качестве анода использовали никелевый кермет. Одним из основных требований к материалу керамики несущей трубки является близкие значения КТР к материалу электролита. В данном случае, основываясь на близости КТР, была выбрана трубка из стабилизированного иттрием диоксида циркония. Измерительная ячейка также была укомплектована рядом других составляющих (рисунок 2.2), а именно: токоподводами с механическим прижимом и газоподводом для подачи топлива – газообразного водорода. Механическое прижимное устройство платиновых токоподводов (сделанное из керамической соломки с закрепленной на нем пружинкой в холодной части ячейки), обеспечивает надежный электрический контакт при работе устройства, а так же фиксацию таблетки при герметизации ячейки. Для герметизации анодного пространства ячейку нагревали. В процессе нагревания происходит удаление органического связующего и при дальнейшем повышении температуры происходит размягчение высокотемпературного стекла, в результате ячейка герметизируется. После охлаждения поверхность высокотемпературного стекла становится гладкой, что может служить косвенным свидетельством того, что клей расплавился и герметизировал сочленение рабочего топливного элемента и газоподводящей трубки. Со стеклом, применяемым в

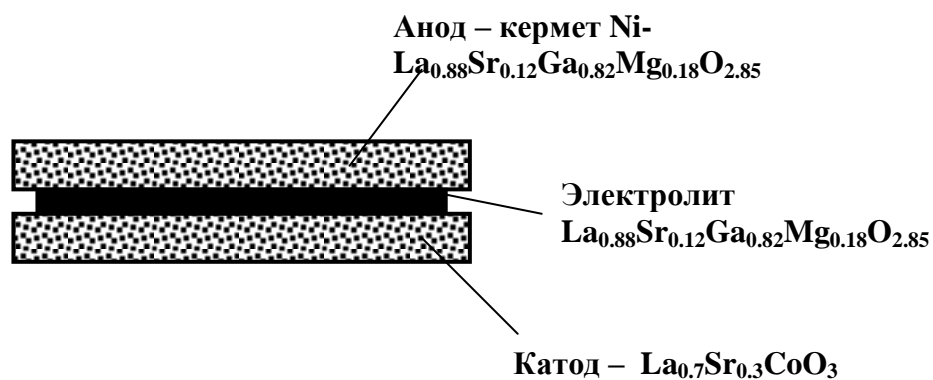


Рисунок 2.1 – Схема топливного элемента планарного типа на основе электролита состава $\text{La}_{0.88}\text{Sr}_{0.12}\text{Ga}_{0.82}\text{Mg}_{0.18}\text{O}_{2.85}$

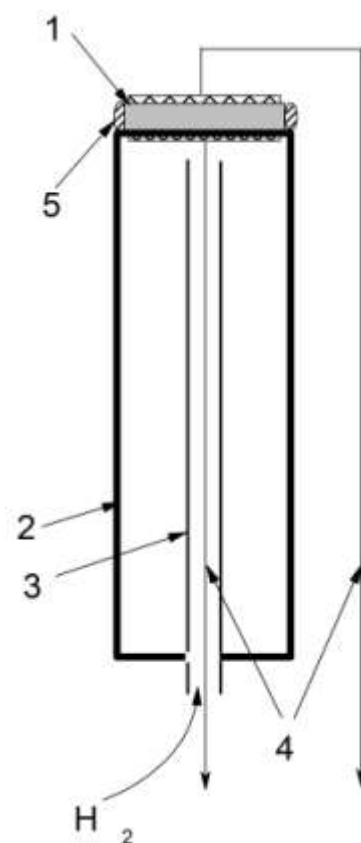


Рисунок 2.2 – Схема измерительной ячейки для испытания единичного топливного элемента: 1 – единичный топливный элемент планарного типа; 2 – керамическая трубка из стабилизированного диоксида циркония; 3 – керамическая трубка для подачи топлива на анод топливного элемента; 4 – платиновые токоподводы; 5 – клей для герметизации анодного пространства

данной работе, герметизация ячейки происходила при температуре 1200° С в течение 10-15 мин.

После герметизации ячейку охлаждали до температуры 900° С и проводили измерения согласно методике описанной ниже.

2.2 Методика аттестации топливного элемента

Измерения проводили в диапазоне температур 500-900°С с интервалом в 50°С. В качестве топливного газа использовался водород. Водород получали при помощи генератора водорода ЦветХром. Так как анодом предполагалось использование никелевого кермета, для его формирования через ячейку (со стороны анодной части) сначала пропускали водород в течение 30-40 мин для восстановления оксида никеля и во избежание окисления никеля подачу газа не прекращали в течение всего цикла измерений.

Аттестацию топливного элемента проводили путем измерения вольтамперных характеристик. Для этого собирали электрическую схему, показанную на рисунке 2.3.

Собранную ячейку помещали в печь и разогревали до требуемой температуры (при постоянной подаче водорода), выдерживали при постоянной температуре до достижения постоянного значения напряжения. Сила тока, протекающего через ячейку, варьировалась путем изменения сопротивления цепи (использовался магазин сопротивлений МСР-63 класса 0,05) в диапазоне 100-100000 Ом. После изменения сопротивления снова ждали установления стабильных во времени значений напряжения ячейки и силы тока в цепи. Измерение напряжения проводили при помощи вольтметра Agilent 34401A. Из полученных значений силы тока и напряжения на ячейке рассчитывали мощность работающего топливного элемента. Математическую обработку полученных данных производили в программе Origin 8.0.

2.3 Аттестация топливного элемента с никель-керметным анодом и катодом из кобальтита лантана допированного стронцием состава $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_{3-\delta}$

Согласно литературным данным между электролитом на основе допированного галлата лантана LSGM и электродом из кобальтита лантана стронция LSC происходит взаимодействие [1], однако это взаимодействие не сопровождается образованием низкопроводящих или существенно отличающихся по структуре фаз. Напротив, в результате взаимодействия образуются родственные перовскитовые сложные оксиды и как следствие, происходит повышение электрохимической активности электрода. Такого

рода взаимодействие также приводит и к усилению адгезии материала катода и электролита. Поэтому в качестве катода был выбран электрод состава $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_{3-\delta}$.

На настоящий момент установлено, что никель-керметные электроды обладают наибольшей электрохимической активностью в качестве анода [2], и превосходят в этом другие материалы, поэтому являются наиболее эффективным анодным материалом в топливных элементах. Поэтому в качестве анода используется никель-керметный электрод.

Для топливного элемента, составленного из вышеперечисленных составляющих, были проведены измерения вольтамперных характеристик в интервале температур 650°C – 900°C . Полученные результаты измерений были перестроены в зависимость удельной мощности от силы тока (рисунок 2.4 и 2.5).

Зависимость мощности топливного элемента от силы тока имеет стандартный вид и представляет собой кривую с максимумом. Положение максимума соответствует предельной мощности испытуемого топливного элемента. В таблице 2.1 представлена зависимость предельной мощности от температуры. Как видно из полученных данных (рисунок 2.4 и 2.5 и таблица 2.1) при увеличении температуры происходит заметный рост силы тока, соответствующего максимально достигаемой мощности и достаточно существенное увеличение мощности.

Таблица 2.1 – Зависимость пиковой мощности топливного элемента с Ni-керметным анодом и LSC катодом от температуры

Т, °C	Р, мВт/см ²	$I_{\text{max}} \times 10^5$, А	Напряжение на ячейке, В	ЭДС теор., В
900	0,133	15.8	0,815	1,182
850	0,074	8.990	0,802	1,131
800	0,0508	6.474	0,775	1,081
750	0,0331	4.379	0,742	1,031
700	0,01704	2.455	0,697	0,986
650	0,0064	1.011	0,649	0,930

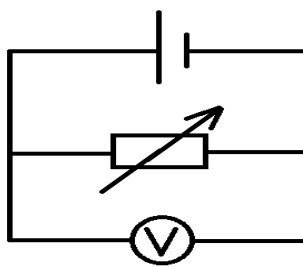


Рисунок 2.3 – Электрическая схема для аттестации топливного элемента

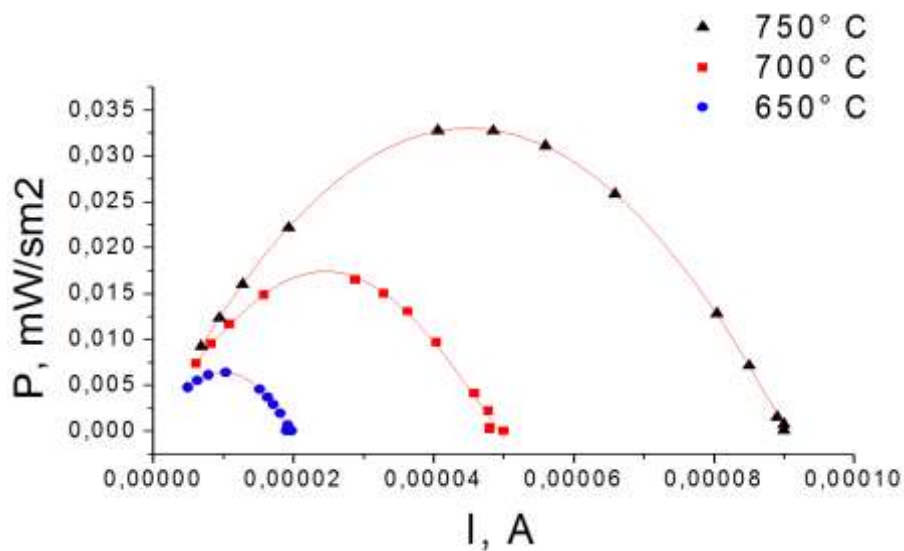


Рисунок 2.4 – Зависимость удельной мощности топливного элемента с Ni-керметным анодом и LSC катодом от силы тока в диапазоне температур 650-750°C

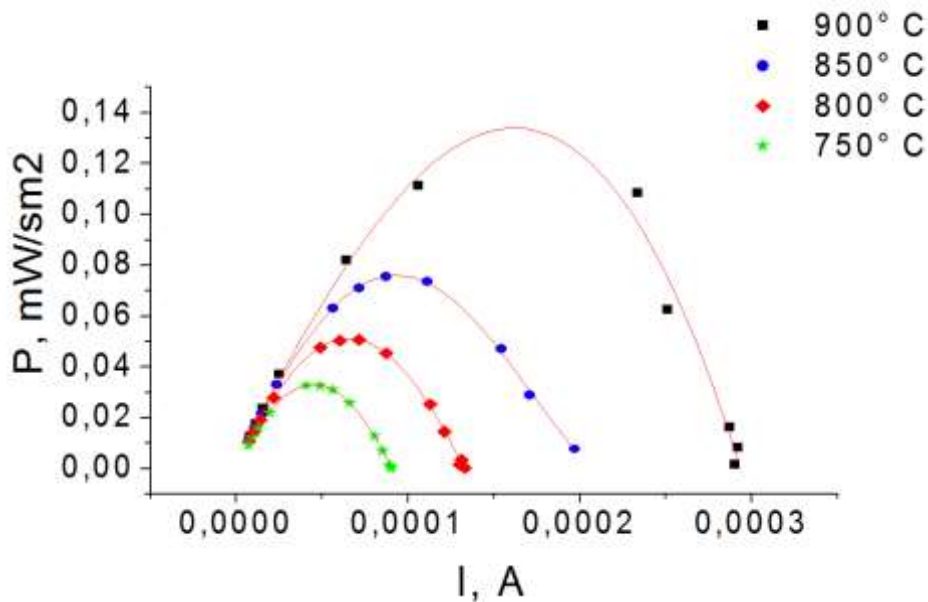


Рисунок 2.5 – Зависимость удельной мощности топливного элемента с Ni-керметным анодом и LSC катодом от силы тока в диапазоне температур 750-900°C

Исходя из общетеоретических подходов, что наблюдаемое изменение мощности в зависимости от температуры может быть обусловлено увеличением электрохимической поляризации на электродах при уменьшении температуры, связанной с кинетическими затруднениями электродных процессов. Электрохимическое поведение системы можно представить в, так называемых, Тафелевских координатах «перенапряжение (η) – логарифм плотности тока» (рисунок 2.6). Из рисунка видно, что с ростом температуры линейный участок достигается при больших плотностях тока. Ток обмена, также увеличивается с ростом температуры. Зависимость тока обмена в Аррениусовских координатах имеет практически прямолинейный вид (рисунок 2.7), что косвенно свидетельствует в пользу неизменности механизма электрохимических реакций на электродах при всех используемых температурах.

Одной из причин, которые могут приводить к замедлению электродного процесса является замедленная стадия подвода участника реакции, а именно процесс лимитируется стадией диффузии кислорода к границе раздела. Эта проблема в случае катода со смешанным типом проводимости, каковым является кобальтит лантана и стронция LSC, может быть частично решена путем увеличения площади контакта электрод – электролит изготовлением композитного электрода. Другой причиной замедленного электродного процесса может служить медленная стадия электрохимического восстановления молекулярного адсорбированного кислорода до ионов. Эта реакция может быть ускорена введением катализатора, каковым является мелкодисперсная платина. Поэтому следующим этапом явилось испытание ячейки, в которой катод со смешанным типом проводимости (LSC) был модифицирован комплексно – введением материала электролита (LSGM) и катализатора в виде мелкодисперсной платины.

2.4 Аттестация топливного элемента с Ni-керметным анодом и композитным катодом

Топливный элемент с композитным катодом был изготовлен и протестирован аналогично методикам, используемым для элемента с LSC катодом. Композитный катод был получен смешением приблизительно одинаковых по объему количеств LSC, LSGM и мелкодисперсной платины (платиновой черни). Аттестацию топливного элемента с композитным катодом проводили в диапазоне температур 500-900°C. Полученные результаты измерений были перестроены в зависимости удельной мощности от силы тока (рисунок 2.8 и 2.9).

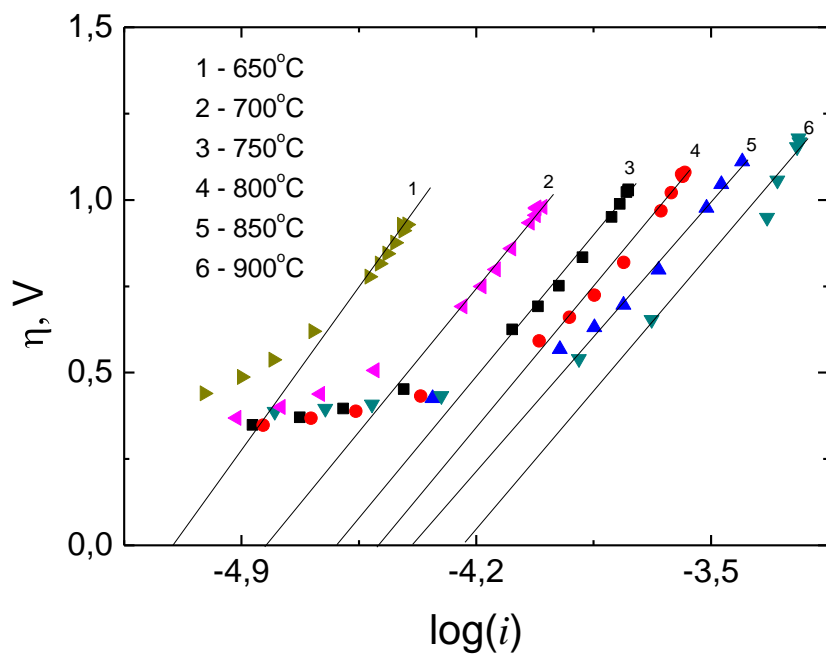


Рисунок 2.6 – Зависимость перенапряжения на ячейке с LSC катодом от плотности тока

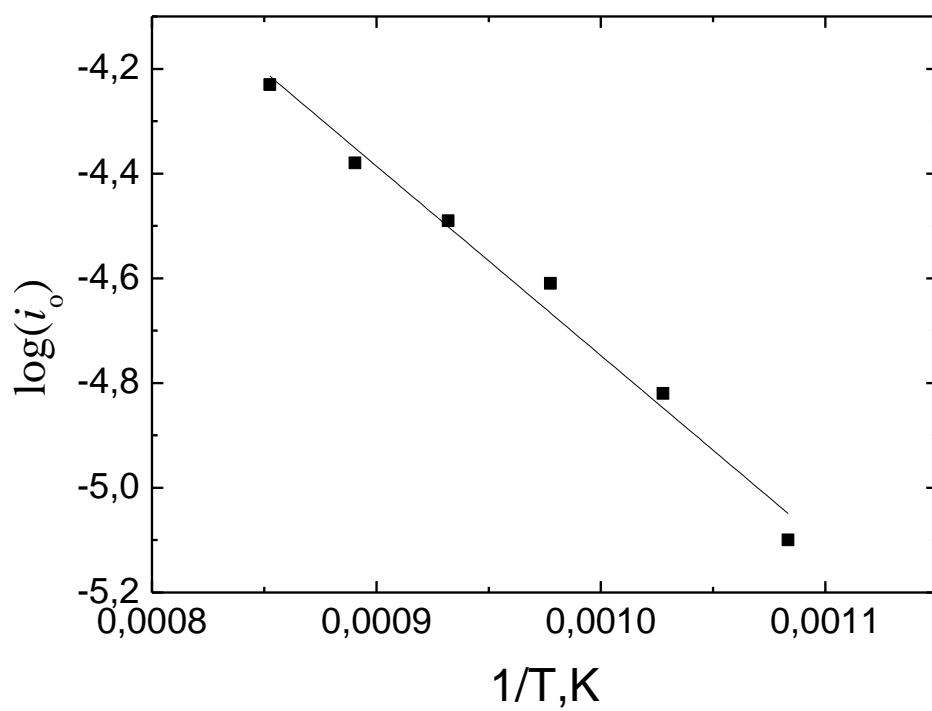


Рисунок 2.7 – Температурная зависимость тока обмена на электродах в ячейке с LSC катодом

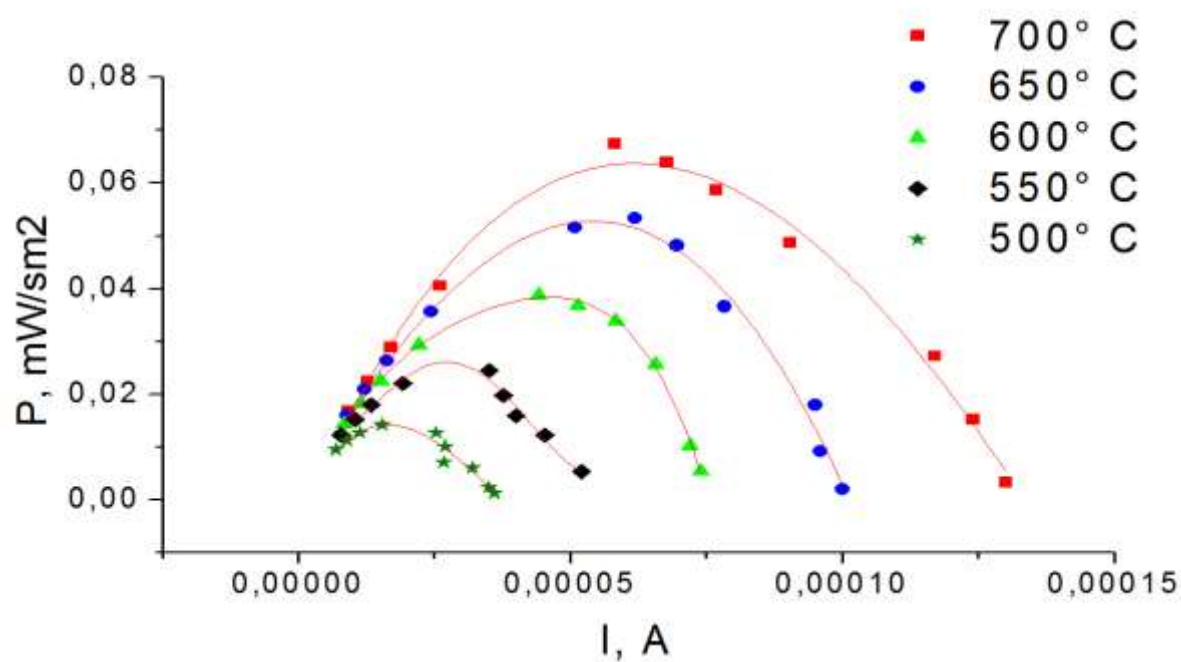


Рисунок 2.8 – Зависимость удельной мощности топливного элемента с Ni-керметным анодом и композитным (LSC-LSGM-Pt) катодом от силы тока в диапазоне температур 500-700°C

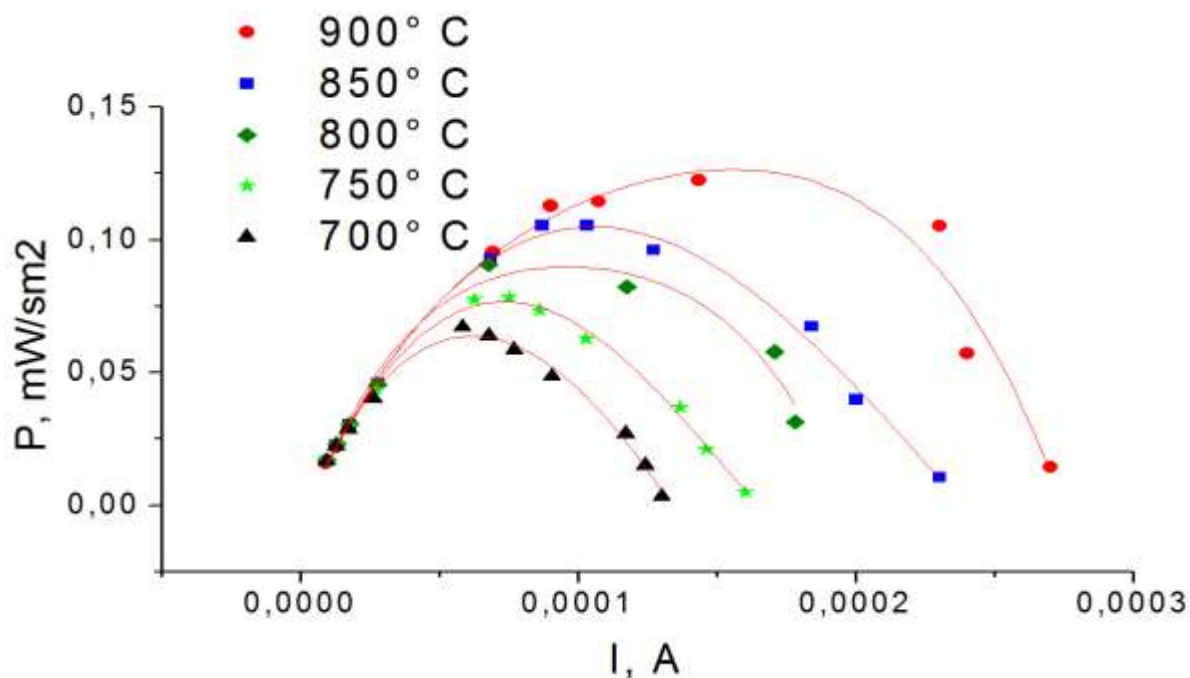


Рисунок 2.9 – Зависимость удельной мощности топливного элемента с Ni-керметным анодом и композитным (LSC-LSGM-Pt) катодом от силы тока в диапазоне температур 700-900°C

По положению максимума на вольт-амперной характеристике для каждой температуры была определена пиковая мощность топливного элемента. Зависимость данного параметра от температуры представлена в таблице 2.2.

У топливного элемента с композитным катодом наблюдается меньший по значениям спад мощности при понижении температуры. Такая зависимость обусловлена увеличением скорости стадий диффузии кислорода и его ионизации при прочих равных условиях, благодаря введению в состав электрода мелкодисперсной платины и порошка электролита. Это также видно из зависимостей в Тафелевских координатах (рисунок 2.10). Выход на прямолинейный участок реализуется при больших плотностях тока, и они расположены ближе друг к другу. Соответственно и значения токов обмена больше, чем в случае с LSC катодом, что свидетельствует о более высоких скоростях электродных процессов. Температурная зависимость токов обмена (рисунок 2.11) разбивается на два участка: высокотемпературную (900 – 700°C) и низкотемпературную (700 – 550°C). При температуре 700°C наблюдается излом, что может свидетельствовать о смене лимитирующей стадии в суммарных электродных процессах.

Таблица 2.2 – Зависимость характеристик топливного элемента с Ni-керметным анодом и композитным катодом от температуры

Т, С	Р, мВт/см ²	Напряжение на ячейке, В
900	0,126	1,182
850	0,104	1,131
800	0,09	1,081
750	0,078	1,031
700	0,064	0,983
650	0,053	0,979
600	0,038	0,943
550	0,026	0,907

500	0,0133	0,832
-----	--------	-------

На рисунке 2.12 для сравнения представлены зависимости пиковой мощности ячеек с LSC катодом и композитным катодом. Видно, что преимущества композитного катода особенно ощутимы при понижении рабочей температуры.

2.5 Оценка эффективности и стабильности работы топливного элемента

Оценка эффективности работы ячеек проводилась путем оценки полноты окисления подаваемого водорода. Установка для получения водорода снабжена системой его осушки перед подачей в газовую систему. Скорость подачи водорода поддерживали примерно 60 мл/мин. Газ после прохождения через ячейку анализировали на содержание продукта окисления – воды. Для этого газ пропускали через предварительно взвешенную склянку с водопоглотителем (аскаритом), которую по окончании эксперимента снова взвешивали, определяя, таким образом, количество выделяющейся воды в единицу времени. Очевидно, что получаемые таким образом результаты являются оценочными, но, тем не менее, они достаточно хорошо коррелировали со значениями теоретически рассчитанными по закону Фарадея, используя измеряемую силу тока.

Стабильность работы во времени была протестирована для обеих исследованных ячеек. Для этого проводили непрерывные измерения в течение 100 часов при максимальной исследованной температуре 900°C. Было обнаружено, что в процессе работы существует некоторая деградация ячеек, соответствующая падению рабочего напряжения ячейки при постоянной поддерживаемой силе тока с LSC катодом примерно в 0,05% в час, а для ячейки с композитным катодом – 0,04% час. После разбора ячеек был проведен рентгенографический анализ катодной и анодной частей ячеек. Ранее упоминалось, что описанное в литературе взаимодействие лантан-стронциевого кобальтита с допированным галлатом лантана не приводит к ухудшению электрохимических свойств. Однако, в литературе практически отсутствуют сведения о возможности взаимодействия никеля с материалом электролита – допированным галлатом лантана. Рентгенографический анализ показал, что такое взаимодействие, хотя и медленно, но происходит. В качестве продуктов взаимодействия были обнаружены галлаты лантана и стронция. Подобные результаты при изучении никель-галлатного кермета были получены в работе [3]. Другими возможными продуктами такого взаимодействия могут быть шпинелеподобные сложные оксиды никеля и магния [4].

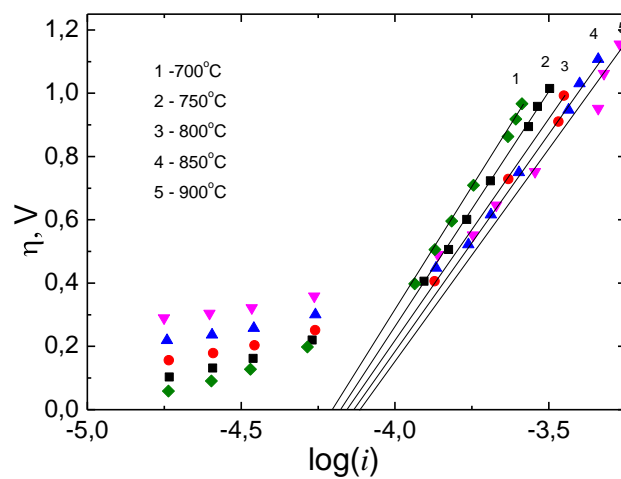


Рисунок 2.10 – Зависимость перенапряжения на ячейке с композитным катодом от плотности тока

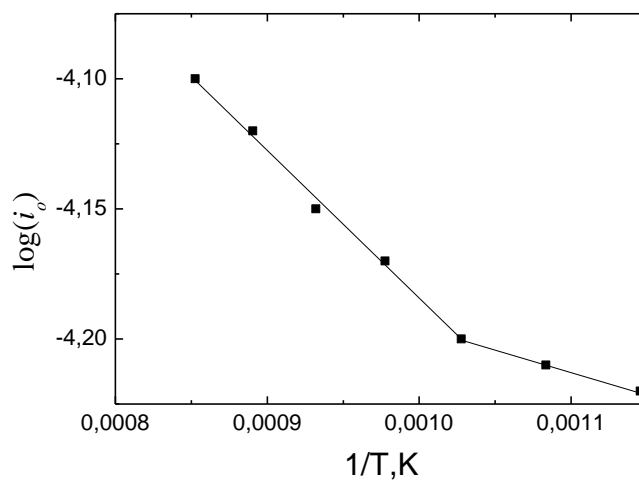


Рисунок 2.11 – Температурная зависимость тока обмена на электродах в ячейке с композитным катодом

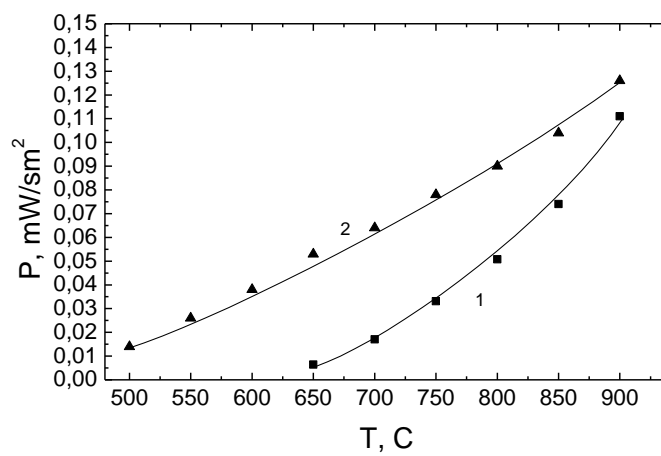


Рисунок 2.12 – Зависимости пиковой мощности ячеек с LSC катодом (1) и композитным катодом (2)

Выделение плохопроводящих фаз, по-видимому, и приводило к деградации изучаемых элементов во времени. Возможные пути решения этой проблемы можно искать в нанесении подслоя из высокопроводящих, химически инертных фаз со структурой перовскита, или им подобных.

3. Анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого немонохроматического светового нагрева. Анализ возможностей применения периодических доменных структур и определение оптимальной номенклатуры нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения для построения приборов на новых физических принципах

3.1 Анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого светового нагрева

На предыдущих этапах проекта была разработана улучшенная методика создания регулярных прецизионных микродоменных структур в пластинах легированного MgO ниобата лития (MgO:LN) с использованием периодических электродов, которая состоит в воздействии импульсного лазерного излучения на поверхность пластины с периодическими электродами с одновременным или последующим приложением электрического поля.

Реализована методика создания периодической прецизионной доменной структуры в пластинах MgO:LN при воздействии импульсного лазерного облучения и неоднородного электрического поля. Предварительное импульсное воздействие лазерным излучением приводит к образованию приповерхностных доменов под краями полос электрода (увеличению плотности зародышей), не выходящих за пределы полос. Одновременное или последующее приложение высокого напряжения приводит к разрастанию, слиянию и прорастанию сквозь пластину образовавшихся доменов и как следствие к формированию сквозной доменной структуры, соответствующей рисунку полосового электрода. При этом за счет пространственно неоднородного нагрева возникающее при охлаждении пьезоэлектрическое поле подавляет рост доменов за пределами отдельных полос электрода.

Пластины облучались ИК излучением с длиной волны 10.6 мкм. Выбор длины волны позволил упростить интерпретацию полученных результатов и предположить, что определяющую роль играет воздействие пироэлектрического поля.

Импульсное облучение поверхности пластины с полосовыми электродами приводило к неоднородному нагреву поверхностного слоя за счет различия коэффициентов поглощения и подбора такой длительности импульса, при которой не происходило выравнивания температуры за счет теплопроводности. При этом поверхность под электродом нагревалась существенно сильнее. Охлаждение нагретого слоя после окончания импульса приводило к увеличению спонтанной поляризации и к появлению пироэлектрического поля, приводящего к формированию приповерхностных доменов.

Проведенный нами расчет пространственного распределения проекции на полярную ось пироэлектрического поля, возникающего при охлаждении после неоднородного нагрева поверхности пластины с полосовыми электродами импульсом лазерного излучения, показал наличие следующих особенностей:

- под краями полосового электрода возникает максимальное значение проекции пироэлектрического поля на полярную ось, способствующей формированию приповерхностных доменов;
- знак проекции пироэлектрического поля на полярную ось между полосами электрода препятствует переключению поляризации и приводит к подавлению роста приповерхностных доменов за пределы электродов.

Было продемонстрировано, что образование приповерхностных доменов в результате воздействия импульса лазерного излучения существенно улучшает пространственную однородность формирующейся доменной структуры при последующем приложении электрического поля и позволяет создавать доменную структуру, параметры которой точно соответствуют параметрам структуры полосовых электродов.

Таким образом, удалось разработать методику, позволяющую формировать сквозные доменные структуры в монокристаллической пластине нелинейно-оптического сегнетоэлектрика ниобата лития, легированного MgO:LN, в соответствии с рисунком полосового электрода. Показано, что использование разработанной методики позволяет создавать периодические полосовые структуры для преобразования частоты лазерного излучения. Было высказано утверждение о том, что полученные структуры могут быть использованы как в оптических системах записи и считывания информации, так и в волоконно-оптической связи и в лазерных проекционных системах.

Вместе с тем работу нельзя считать завершенной, поскольку не был достаточно глубоко изучен механизм формирования нанодоменной структуры в результате импульсного лазерного облучения, что затрудняло оптимизацию разрабатываемых методик создания периодических доменных структур.

Ранее мы предполагали, что нанодоменная структура формируется в результате импульсного лазерного облучения в основном под действием пирозлектрического поля, однако это предположение требовало экспериментального подтверждения. Для этого было проведено исследование формирования доменной структуры в сильнонеравновесных условиях переключения, создаваемых в результате локального импульсного нагрева, что позволило существенно увеличить напряженность переключающего пирозлектрического поля.

Локальный нагрев исследуемой пластины производился как импульсами лазерного излучения, так и пропусканием импульсов тока вдоль металлического электрода, нанесенного на полярную поверхность. При таких воздействиях нагревалась только часть пластины, и последующее охлаждение осуществлялось переносом тепла в не нагретую часть. При интерпретации результатов ограничивались приближением однородного изменения температуры [1].

3.1.1 Нагрев пропусканием импульсов тока вдоль металлического электрода, нанесенного на полярную поверхность

Образование новых доменов в монодоменной пластине под действием пирозлектрического поля возможно лишь при нагреве выше температуры, при которой происходит полное экранирование деполяризующего поля T_{\max} . В этом случае при охлаждении пирозлектрическое поле изменяет знак и становится переключающим.

Резистивный нагрев пропусканием импульса тока вдоль нанесенных на одну полярную поверхность полосовых электродов использовался для того, чтобы продемонстрировать возможность ориентированного роста доменных лучей в пирозлектрическом поле. Для исследований использовались пластины MgO:CLN толщиной 0.5 мм. Плотность выделяемой энергии определялась из Джоулева тепла

$$\Delta Q = I^2 R t, \quad (3.1)$$

где I – сила тока, R – сопротивление, t – длительность импульса.

При плотности энергии 5 Дж/см² и длительности импульса тока 0,5 мс образовывались изолированные несквозные домены с концентрацией 50 мм⁻² (рисунок 3.1). При плотности энергии более 10 Дж/см² доменная структура качественно

изменялась и наблюдался анизотропный рост преимущественно вдоль трёх Y направлений доменных лучей шириной от сотен нанометров до единиц микрон (рисунок 3.2).

Таким образом, удалось однозначно показать, что такие же доменные структуры, что и при использовании лазера, могут быть созданы в результате импульсного резистивного нагрева. Полученный результат является подтверждением пирозлектрической природы переключающего поля.

3.1.2 Облучение инфракрасными лазерными импульсами

Для понимания механизма возникновения доменной структуры принципиальную роль играет непосредственное наблюдение ее формирования с помощью оптической поляризационной микроскопии

Необходимо отметить, что для формирования нанодоменных структур в LN нужно использовать сильно поглощаемое лазерное излучение ультрафиолетового (УФ) и инфракрасного (ИК) диапазонов. Выбор ИК облучения обусловлен тем, что оно только нагревает кристалл, тогда как УФ излучение дополнительно увеличивает концентрацию носителей заряда, что влияет на формирование доменной структуры

Для дальнейшего увеличения скорости нагрева использовалось облучение с помощью инфракрасного (ИК) импульсного CO_2 лазера с длиной волны 10.6 мкм. При этом скорость и максимальная температура нагрева определялись плотностью энергии, длительностью импульса и температурой пластины во время облучения.

3.1.2.1 Кинетика формирования доменной структуры в результате импульсного лазерного облучения

Все имеющиеся к настоящему времени данные о самоорганизованных доменных структурах, возникающих в результате импульсного лазерного облучения, были получены только из анализа статических структур.

Нами впервые был непосредственно визуализирован с высоким разрешением по времени (с помощью скоростной видеокамеры) процесс формирования доменной структуры в результате импульсного лазерного облучения пластины CLN. В процессе измерений полярная Z^+ поверхность пластины размерами 20x20x0.5 мм облучалась при комнатной температуре одиночным ИК импульсом длительностью от 1 до 4.5 мс. Плотность энергии на поверхности пластины изменялась при этом от 5 до 18 Дж/см².

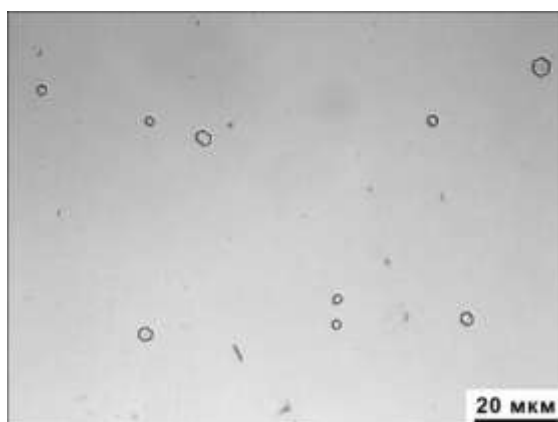


Рисунок 3.1 – Изолированные домены, образовавшиеся после пропускания вдоль электрода импульса тока. Длительность 0,5 мс, плотность энергии 5 Дж/см². Оптическая микроскопия после химического травления. MgO:CLN

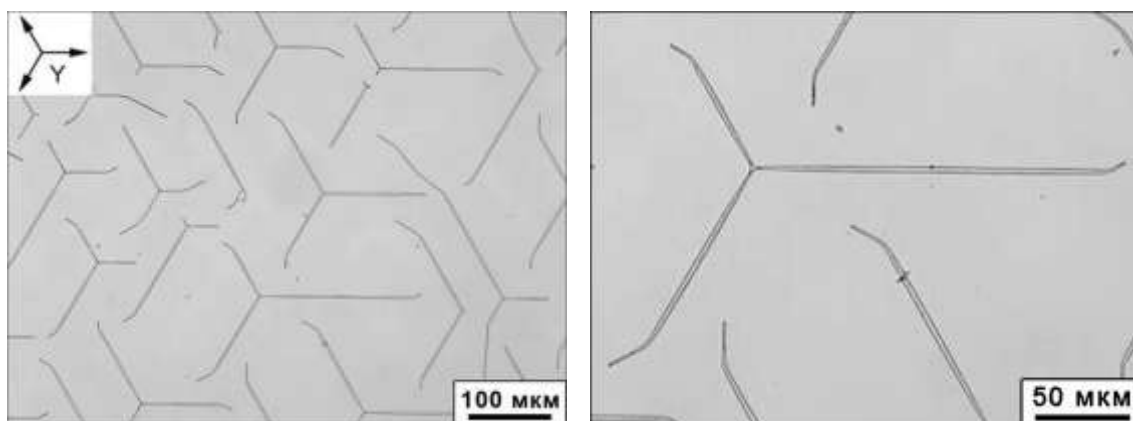


Рисунок 3.2 – Доменные лучи, образовавшиеся после пропускания вдоль электрода импульса тока. Длительность 0,5 мс, плотность энергии 11,3 Дж/см². Оптическая микроскопия после химического травления. MgO:CLN

В результате непосредственно в процессе формирования доменной структуры были получены серии мгновенных изображений доменов с хорошим контрастом и достаточным разрешением по времени (рисунок 3.3). Было обнаружено, что конечная структура является стабильной и в отличие от переключения в электрическом поле, отсутствует самопроизвольное обратное переключение.

Удалось определить полное время формирования структуры, которое изменялось от 10 до 90 мс при изменении длительности облучающего импульса. Важно отметить, что наблюдалась задержка между окончанием импульса и началом переключения длительностью от 3 до 35 мс. В рамках рассмотренной модели задержка соответствует времени охлаждения пластины до температуры, при которой пирозлектрическое поле превышает пороговое значение (рисунок 3.4). Оценка изменения температуры поверхности пластины дает близкие результаты.

Анализ полученных изображений позволил выявить три последовательных стадии эволюции доменной структуры: 1) зародышеобразование, 2) рост доменных лучей, и 3) ветвление [2]. Образование новых доменов происходило на краю облученной зоны (рисунок 3.3,а), что обусловлено увеличением вероятности зародышеобразования, вызванным образованием максимумов пирозлектрического поля после окончания импульса [1] (рисунок 3.5). Одномерный рост доменных лучей наблюдается от края к центру облученной зоны преимущественно вдоль трёх Y кристаллографических направлений (рисунок 3.3,б). При ветвлении появлялись лучи второго поколения, рост которых начинался от лучей первого поколения (рисунок 3.3,в).

Исследование конечной статической доменной структуры с высоким пространственным разрешением методом СМПО показало, что лучи представляют собой на начальной стадии цепи изолированных нанодоменов, которые становились непрерывными лучами в результате роста и слияния (рисунок 3.6,а).

Установлено, что на стадии ветвления всегда существует задержка между образованием лучей первого и второго поколения (рисунок 3.7,а). При этом рост лучей второго поколения, как правило, происходит в X направлении перпендикулярно лучу первого поколения и начинается на некотором расстоянии от него (рисунок 3.6,з).

Впервые были выявлены два сценария формирования трёх лучевой звезды в центре облученной зоны.

Первый сценарий аналогичен ветвлению и начинается с образования изолированного домена с последующим ростом доменных лучей в Y направлениях (рисунок 3.7,б). Первый и второй лучи растут одновременно, а рост третьего луча начинается после задержки на некотором расстоянии от предыдущих двух лучей

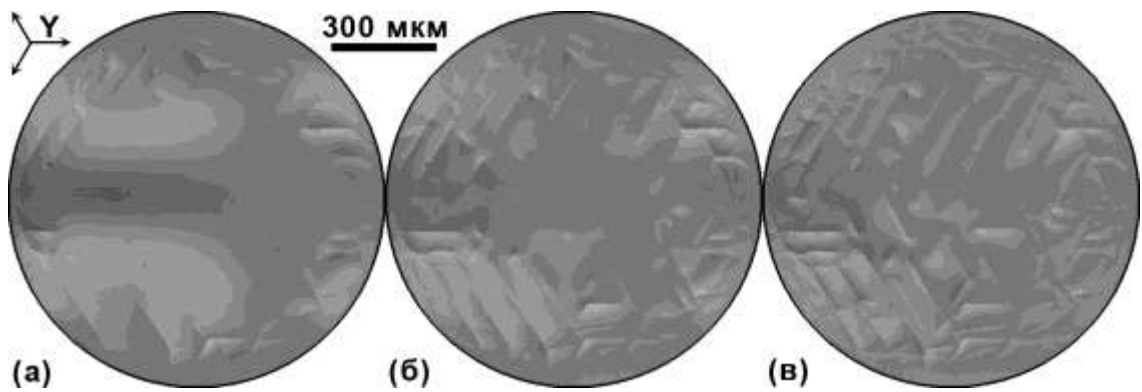


Рисунок 3.3 – Мгновенные изображения доменной структуры в CLN после облучения одиночным ИК импульсом через (а) 11 мс, (б) 28 мс, (в) 78 мс от начала импульса. Длительность импульса 3 мс, плотность энергии 12.7 Дж/см²

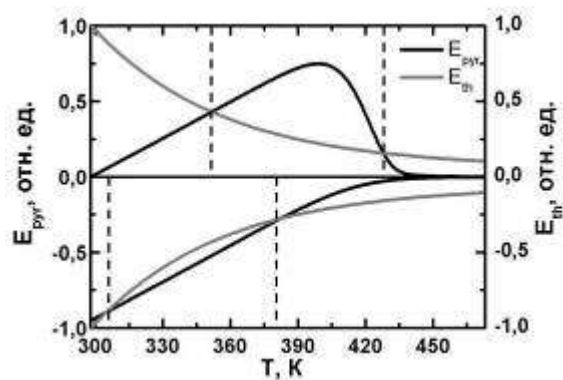


Рисунок 3.4 – Расчетная температурная зависимость пьроэлектрического поля E_{pyr} при нагреве от 300K до 490K и последующем охлаждении с постоянной скоростью изменения температуры 10K/мин и температурная зависимость порогового поля E_{th}

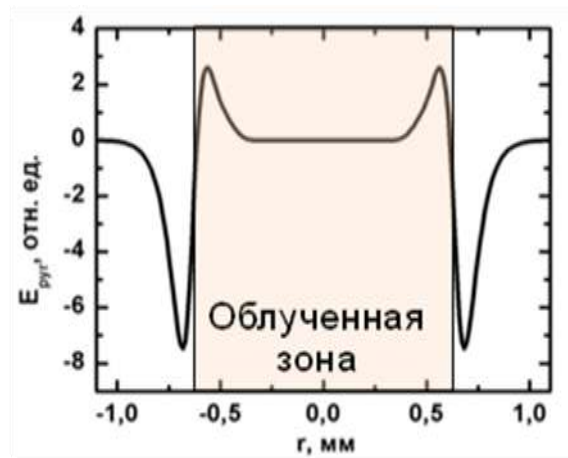


Рисунок 3.5 – Расчетное распределение $E_{руг}$ после импульсного облучения [1]

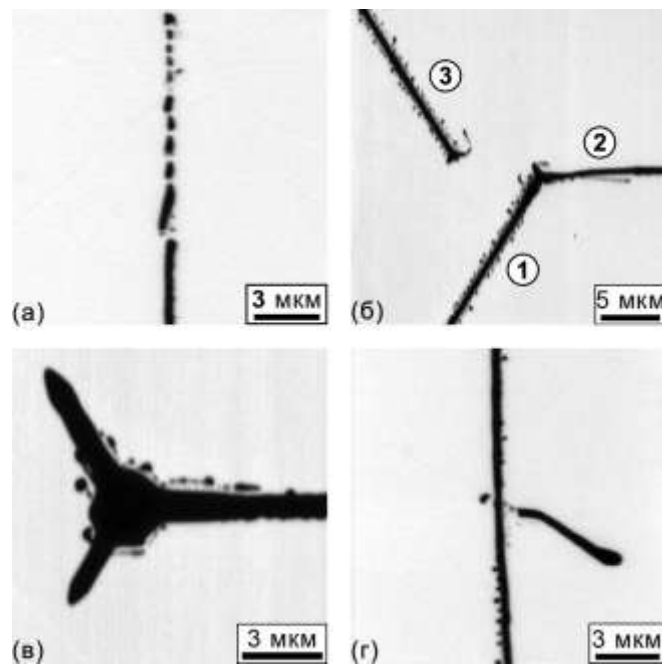


Рисунок 3.6 – (а) Цепь изолированных нанодоменов, переходящая в луч;
(б) и (в) формирование трёх лучевой звезды; (г) ветвление в CLN. Метод СМПО

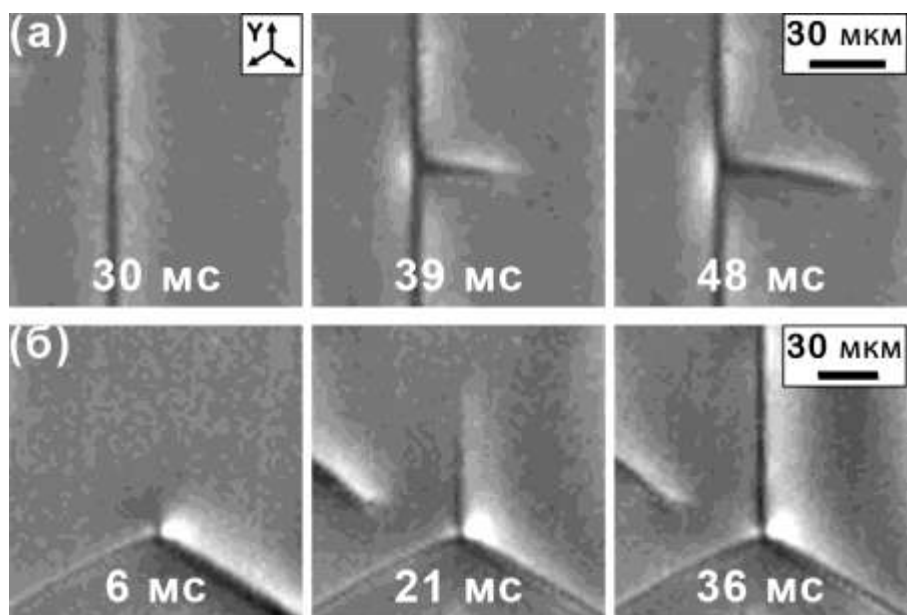


Рисунок 3.7 – (а) Ветвление, (б) формирование трёх лучевой звезды в CLN после облучения одиночным ИК импульсом. Оптическая микроскопия

(рисунок 3.6,б). Таким образом, трёх лучевая звезда состоит из двух лучей первого поколения и одного луча второго поколения (ветви).

Второй сценарий представляет собой одновременный рост трёх лучей из несмежных вершин шестиугольного домена, существовавшего в облученной зоне (рисунок 3.6,в), что обусловлено детерминированным зародышеобразованием [3].

Необходимо отметить, что доля переключенной площади после импульсного лазерного нагрева составляет менее одного процента от площади облученной зоны. Средняя ширина лучей около 500 нм, суммарная длина всех лучей порядка 10 мм, а диаметр облученной зоны 1 мм. Таким образом, в вызванных лазерным нагревом сильнонеравновесных условиях общая длина доменных лучей (L) может быть определена с высокой точностью и является более адекватной характеристикой процесса переключения поляризации, чем их площадь (рисунок 3.8,а). Анизотропия роста лучей, определяемая как доля лучей, ориентированных в Y направлении (L_Y/L), также является важной характеристикой процесса. При формировании доменной структуры анизотропия роста существенно уменьшается (рисунок 3.8,б).

3.1.2.2 Зависимость параметров доменной структуры от условий облучения

Зависимость от температуры пластины. Исследование параметров доменных структур, возникающих в результате облучения одиночным ИК лазерным импульсом, от температуры пластины T_0 проводилось в CLN. Производилось облучение соседних участков одной пластины одинаковыми лазерными импульсами при различных температурах, изменявшихся от комнатной до 390К. Визуализация доменных структур производилась после селективного химического травления с помощью оптического микроскопа в отражённом свете с последующей статистической обработкой полученных изображений.

Типичные доменные структуры, возникающие после лазерного облучения при разной температуре, представлены на рисунке 3.9. Доменные структуры, полученные при температуре ниже 320К, состоят как из Y ориентированных доменных лучей, так и из лучей, растущих в произвольных направлениях, преимущественно на краю облученной зоны. Кроме того наблюдается эффект ветвления (рисунок 3.9,а). Увеличение температуры пластины приводит к линейному уменьшению суммарной длины доменных лучей L (рисунок 3.10,а), эквивалентной переключенному заряду. Кроме того, уменьшается количество ветвлений (рисунок 3.9,б,в). Выше 380 К нагрев одиночным

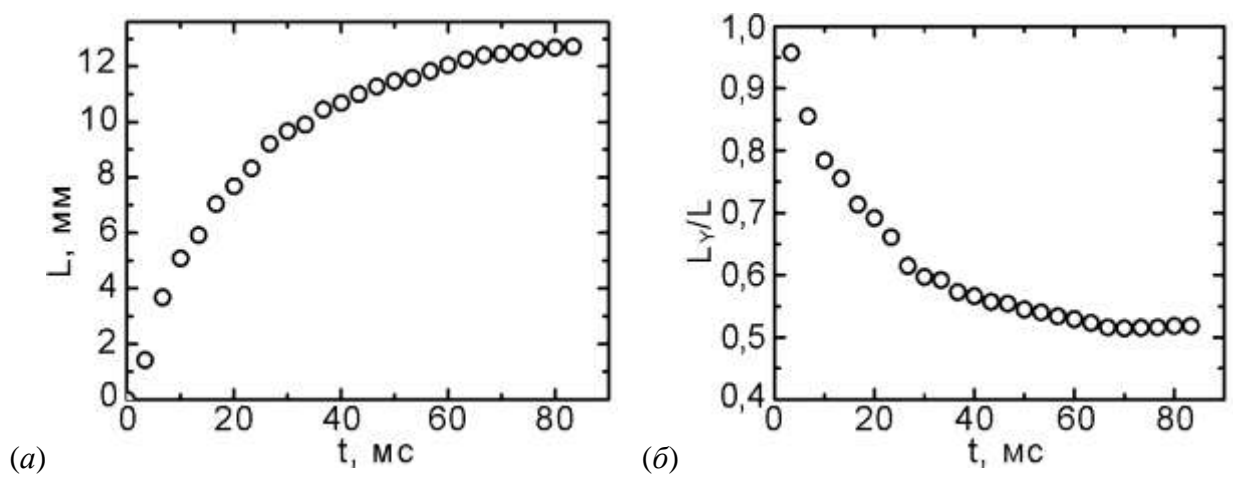


Рисунок 3.8 – Зависимость от времени: (а) длины доменных лучей, (б) анизотропии их роста в CLN после облучения одиночным ИК импульсом

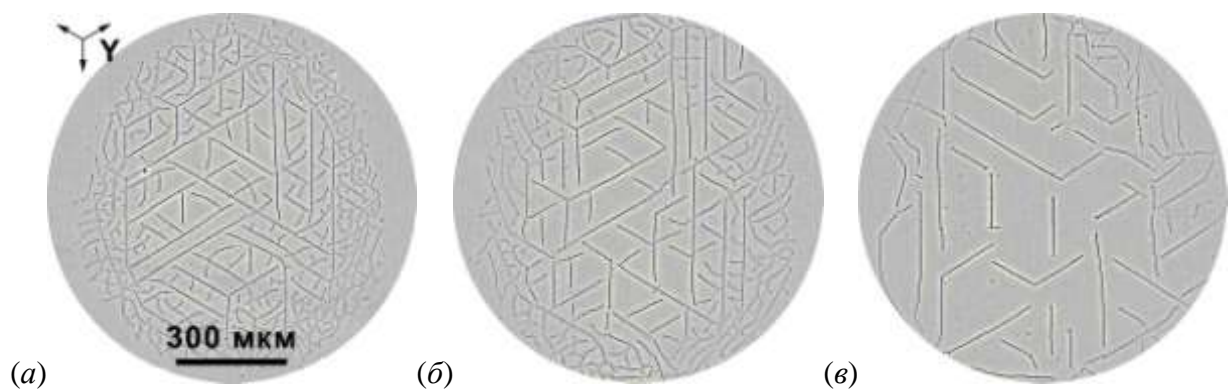


Рисунок 3.9 – Изображения доменной структуры в CLN после ИК лазерного облучения при различной температуре: (а) 320К, (б) 340К; (в) 370К. Длительность импульса 1.5 мс. Плотность энергии 11.7 Дж/см². Оптическая микроскопия. Доменная структура выявлена химическим травлением

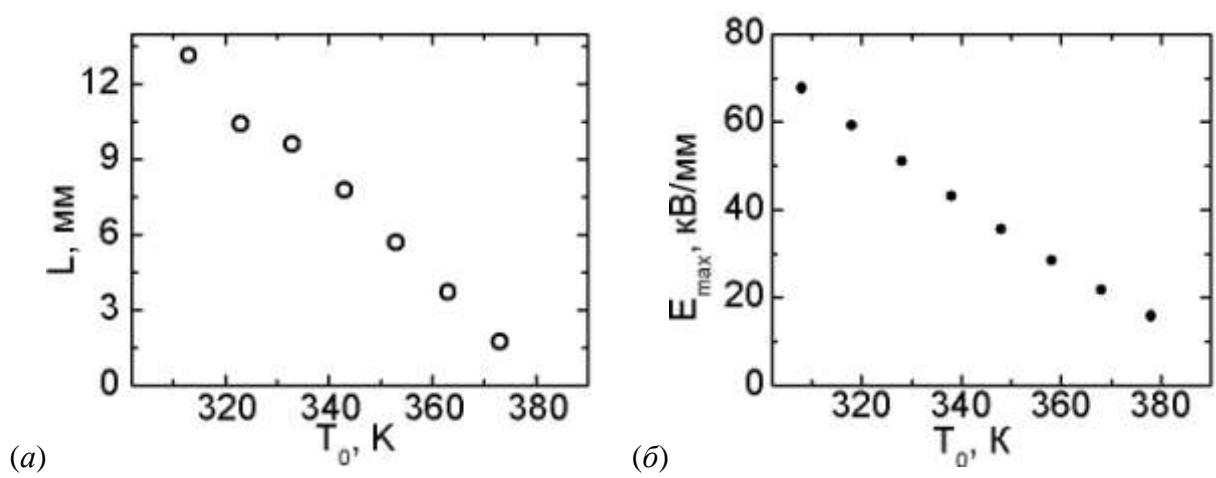


Рисунок. 3.10 – Зависимость от температуры пластины (а) общей длины доменных лучей в CLN после импульсного облучения, (б) рассчитанного значения E_{\max}

лазерным импульсом при данной плотности энергии и длительности импульса не приводил к формированию доменной структуры.

Доля переключенной области пропорциональна максимальному изменению пирозлектрического поля E_{max} . С помощью компьютерного моделирования было показано, что увеличение температуры пластины приводит к линейному уменьшению (рисунок 3.10,б), что объясняет экспериментально наблюдаемое уменьшение общей длины доменных лучей при увеличении температуры.

3.1.3 Особенности формирования доменных структур, индуцированных ИК лазерным излучением, в ниобате лития, легированном MgO

Исследования показали, что в CLN, легированном MgO, качественно изменяется вид доменных структур, возникающих после ИК лазерного облучения. В этом случае доменные структуры состоят из большого количества триплетов, лучи которых строго ориентированы вдоль Y кристаллографических направлений (рисунок 3.11). Длина лучей в триплетах достигает нескольких десятков микрон. Наблюдается выраженный эффект ветвления. Существенно ослабляется взаимодействие лучей, что проявляется в отсутствии эффекта отражения.

Различие доменной структуры в MgO:CLN и нелегированного CLN связано с различной электропроводностью этих кристаллов. Более высокая проводимость MgO:CLN приводит к более эффективному объемному экранированию деполяризующего поля. В результате при одинаковых условиях облучения возникающие пирозлектрические поля существенно меньше, чем в CLN, и доменные лучи растут анизотропно, преимущественно вдоль Y направлений.

Установлено, что увеличение длительности лазерного импульса приводит к качественному изменению доменной структуры: в центре облученной зоны, что проявляется в уменьшении концентрации нанодоменных лучей и уменьшении проявления эффекта ветвления вплоть до его полного исчезновения (рисунок 3.11,г).

Наблюдаемые эффекты могут быть отнесены за счет уменьшения пирозлектрического поля в центре облученной зоны при больших длительностях импульса.

Таким образом, проведенные детальные экспериментальные и теоретические исследования кинетики доменов под действием пирозлектрического поля, возникающего при охлаждении после импульсного нагрева, позволили заложить основы для создания технологий изготовления нанодоменных структур. Изменение длительности импульсов и

плотности энергии позволяет управлять анизотропией роста доменных лучей и их средним периодом. Последующее приложение электрического поля позволяет изготавливать периодические доменные структуры в монокристаллах ниобата лития.

3.2 Анализ возможностей применения периодических доменных структур и определение оптимальной номенклатуры нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения для построения приборов на новых физических принципах

Как правило, источники лазерного излучения имеют фиксированную длину волны, которая определяется энергиями переходов между различными состояниями электронной оболочки ионов. В то же время, для применения зачастую необходимы лазеры с различной длиной волны, а также с возможностью ее перестройки. Преобразование длины волны лазерного излучения позволяет расширить диапазон доступных длин волн. Среди областей применения лазеров с преобразованием длины волны: проекционная техника, лазерная локация, зондирование атмосферы, медицинская диагностика, хирургия, прецизионная маркировка и обработка различных материалов, спектроскопия и разнообразные научные применения.

Для эффективного преобразования необходимо выполнять условие фазового синхронизма – равенство фазовых скоростей накачки и преобразованного излучения. Традиционным решением является использование двух ортогонально поляризованных оптических волн, сдвиг фаз между которыми компенсируется за счет двулучепреломления. Невысокие значения нелинейно-оптических коэффициентов и наличие углового апертурного эффекта приводят к низкой эффективности преобразования и ухудшению качества пучка. Кроме того, диапазон длин волн, для которых в определенном кристалле можно реализовать условия фазового синхронизма, существенно ограничен.

Альтернативным способом является применение «фазового квазисинхронизма» с периодической модуляцией знака нелинейной восприимчивости (рисунок 3.12). При этом волновой вектор периодической структуры подбирается таким образом, чтобы скомпенсировать разницу волновых векторов взаимодействующих волн. Эффект был теоретически рассмотрен в начале 1960-х в классической работе Дж. Армстронга и Н. Бломбергена с соавторами, но практическое применение получил только в середине 1990-х годов.

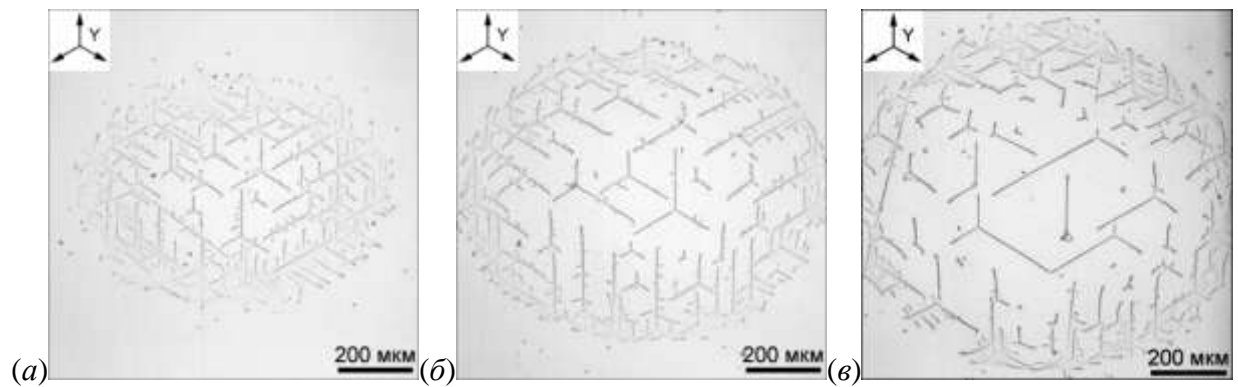


Рисунок. 3.11 – Зависимость доменной структуры в MgO:CLN от длительности ИК лазерного импульса: (а) 1.5 мс; (б) 2.5 мс; (в) 3.5 мс. Оптическая микроскопия. Доменная структура выявлена химическим травлением

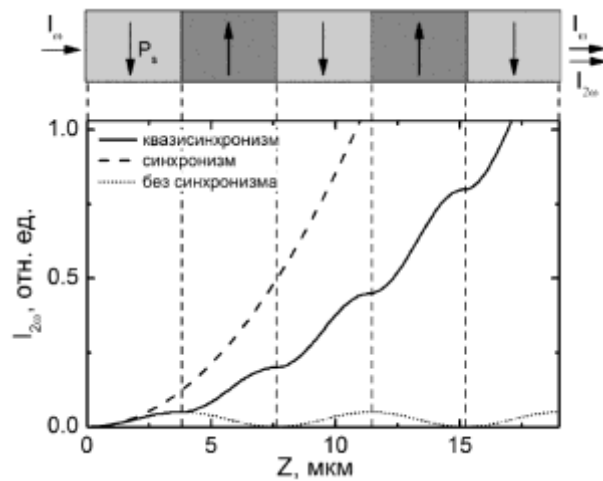


Рисунок. 3.12 – Изменение интенсивности излучения второй гармоники $I_{2\omega}$ при различных режимах синхронизма с одинаковым значением эффективного нелинейно-оптического коэффициента d_{eff} . Для режима фазового квазисинхронизма схематично показана доменная структура

Для реализации фазового квазисинхронизма применяются нелинейно-оптические сегнетоэлектрические кристаллы с регулярной доменной структурой РДС («домены» представляют собой области сегнетоэлектрика с однородным направлением спонтанной поляризации). Локальное изменение направления спонтанной поляризации в электрическом поле используется для создания РДС с заданными геометрическими параметрами. Фазовый квазисинхронизм позволяет осуществлять эффективное взаимодействие волн, поляризованных вдоль оптической оси кристалла, тем самым используя максимальное значение нелинейно-оптического коэффициента (d_{33}) и избегая углового апертурного эффекта. Кроме того, можно обеспечить синхронизм для различных нелинейно-оптических процессов в кристаллах одного типа при выбранной рабочей температуре, а также создавать каскадные преобразователи на одном кристалле. Наиболее популярными материалами для РДС-кристаллов служат монокристаллы семейств ниобата лития (LN) и танталата лития (LT), а также калий титанил фосфата (КТР). Однако, в большинстве применений требуется повышенная стойкость к оптическому повреждению кристалла за счет фоторефрактивных эффектов. Для этого кристаллы ниобата лития и танталата лития легируют MgO. Примесь повышает объемную проводимость и способствует компенсации фоторефрактивных зарядов. В связи с этим оптимальным материалом для создания РДС для оптических применений является ниобат лития, легированный 5% MgO (MgOLN).

Наиболее распространенные применения РДС-кристаллов: а) генерация второй гармоники в сине-зеленом диапазоне, б) параметрическая генерация в среднем ИК диапазоне, в) генерация разностных частот, г) генерация и детектирование ТГц излучения. Источниками накачки служат твердотельные, диодные или волоконные лазеры с узкой спектральной шириной и линейной поляризацией излучения.

Параметрическая генерация излучения в среднем ИК диапазоне имеет потенциал для применения в приборах типа ЛИДАР (“Light Identification, Detection and Ranging” - технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеивания в прозрачных и полупрозрачных средах). В частности, для лазерных дальнометров и систем сопровождения целей требуется переход от излучения с длиной волны вблизи 1 мкм к излучению в спектральном диапазоне, безопасном для человеческого глаза (с длиной волны около 1,5 мкм), которое может быть получено с помощью оптической параметрической генерации. Лазерные приборы зондирования атмосферы, применяемые для контроля содержания различных газов, требуют источники излучения с определенными длинами волн, совпадающими с линиями поглощения газов. В частности,

весьма актуальной является задача обнаружения утечек метана на газопровода, наиболее интенсивная линия поглощения которого имеет длину волны около 3.2 мкм, которая в настоящее время получается с помощью низкоэффективных, дорогих и габаритных He-Ne лазеров. Применение оптической параметрической генерации с волоконными лазерами (в качестве источников излучения накачки) позволит существенно снизить энергопотребление и сделать такие ЛИДАРЫ мобильными, годными в частности для размещения на беспилотных летательных аппаратах.

Генерация второй гармоники может быть использована, в частности, для получения излучения в сине-зеленом диапазоне из излучения в ближнем ИК диапазоне, генерация которого легко реализуется с помощью большого разнообразия полупроводниковых, твердотельных и волоконных лазеров. Различные виды лазерной спектроскопии, конфокальная лазерной сканирующей микроскопии требуют применения компактных источников видимого излучения в сине-зеленой части спектра, лазеров с различными длинами волн в сине-зеленой части спектра, которые могут быть получены с применением преобразования длины волны на основе кристаллов с регулярной доменной структурой. Оптические стандарты частоты, изготавливаемые за счет лазерного охлаждения и пленения нейтральных атомов требуют возбуждения в диапазоне длин волн 300-500 нм.

Широкие возможности для применения сине-зеленых лазерных источников имеются в биомедицине для цитометрии (подсчет количества определенных клеток в жидкости) и секвенирования ДНК. Для этого используются флюоресцирующие метки, которые как правило возбуждаются излучением в диапазоне от ближнего УФ до зеленого.

Также источники зеленого излучения используются в подводной оптической связи, оптических системах хранения информации, лазерных проекционных системах.

Генерация разностных и суммарных частот широко применяется в телекоммуникационной технике для преобразования, соответствующего различным каналам спектрального мультиплексирования или преобразования сигнала одного диапазона в другой.

Проблема генерации терагерцового излучения в последнее время становится все более актуальной в связи с широким спектром его применений: для медицины (ТГц томография), телекоммуникаций (системы беспроводной связи) и систем безопасности (ТГц сканеры). Вместе с тем существующие на данный момент методы генерации не обладают достаточной эффективностью и не позволяют делать компактные устройства на их основе. С нелинейно-оптических преобразователей на основе РДС могут быть созданы преобразователи оптического излучения в терагерцовое с частотой 300 ГГц – 3 ТГц.

Следует отметить, что источники излучения в данном диапазоне исключительно важны для развития методов медицинской ТГц томографии, так как она потенциально менее вредна для организма, чем, например, рентгеновская томография за счет гораздо меньшей энергии квантов излучения.

Изготовление элементов для конкретного вида преобразования длины волны требует расчета необходимых параметров доменной структуры.

Основными рассчитываемыми параметрами доменной структуры являются:

- период структуры - Λ
- скважность (соотношение ширины доменов одного знака к периоду) - D
- длина части элемента с периодической доменной структурой (рабочая длина) - L
- ширина элемента - W
- толщина элемента - d
- рабочая температура (температура синхронизма) – T_{qpm}

Ширина элемента определяется, исходя из требований к пучку излучения накачки. Как правило, для получения генерации в объеме элемента второй гармоники излучения, имеющего двумерный гауссов профиль пучка, используется ширина 1-2 мм. Поэтому минимальная ширина периодической части элемента должна соответствовать этому условию. С другой стороны, в разработанной технологии, при необходимости, ширина элемента может быть легко увеличена до 5 мм и даже 10 мм, что необходимо при применении цилиндрической оптики для фокусировки излучения.

Толщина элемента играет важную роль, так как она ограничивает применение широких пучков излучения накачки, что может быть необходимо при больших значениях генерируемой мощности (от 10 Вт и более). На сегодняшний день толщина элементов ограничена толщиной используемых подложек – 0.5 мм и 1 мм. Применение подложек большей толщины затруднено в связи с тем, что в процессе формирования доменной структуры необходимо приложение высокого электрического напряжения, которое может превысить порог электрического пробоя. Тем не менее, разрабатываемая технология открывает возможности преодоления этого порога за счет снижения величины переключающего напряжения, обусловленного формированием зародышей доменов с высокой плотностью с помощью импульсного лазерного облучения. Таким образом, оптимальной толщиной элементов на сегодняшний день является 1 мм.

Длина элемента рассчитывается из требований к эффективности в зависимости от входной мощности и режима накачки (непрерывный или импульсный режим, частоты следования и длительности импульса для импульсного режима). Для повышения коэффициента преобразования требуется повысить плотность мощности излучения

накачки, что делается с помощью фокусировки излучения в кристалл. Показано, что при фокусировке зависимость эффективности преобразования от длины кристалла изменяется от линейной ($\eta \sim L$) при конфокальной фокусировке до квадратичной ($\eta \sim L^2$) при относительно слабой фокусировке.

В случае произвольной фокусировки излучения могут наблюдаться и другие варианты зависимости эффективности преобразования от длины кристалла. Аналитический расчет, проведенный Kleiman с соавторами, показал, что максимальная эффективность преобразования достигается при выполнении следующего условия:

$$l \approx 2.84 * L \quad (3.2)$$

Кроме того, рабочая длина кристалла выбирается в соответствии с режимом работы накачки. Для эффективного преобразования непрерывных

Период доменной структуры выбирается таким образом, чтобы скомпенсировать рассогласование фаз между волнами участвующими в нелинейно-оптическом преобразовании, иными словами обеспечить выполнение условия фазового квазисинхронизма для эффективного преобразования длины волны. В простейшем случае генерации второй гармоники это условие имеет вид:

$$\Delta k = k_{2\omega} - 2 k_{\omega} - 2\pi/\Lambda = 0 \quad (3.3)$$

где $k_{2\omega}$, $2k_{\omega}$ - волновые вектора излучения первой и второй гармоники.

$$k_{\omega} = 2\pi/(\lambda(\omega)) \quad (3.4)$$

В уравнение (3.4) входит показатель преломления n_e для различных температур T и длин волн λ . Такая зависимость в кристаллах ниобата и танталата лития описывается уравнением Селмейера следующего вида:

$$n_e^2(\lambda, T) = a_1 + b_1 f(T) + \frac{a_2 + b_2 f(T)}{\lambda^2 - a_3^2} + \frac{a_4 + b_3 f(T)}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2, \quad (3.5)$$

где a_i , b_i – эмпирические параметры формулы, определяемые экспериментально, $f(T) = (T - 24.5)(T + 570.82)$.

Для конгруэнтных, нелегированных кристаллов параметры этого уравнения известны с достаточно хорошей точностью. Однако, для ниобата лития, легированного MgO (типичная концентрация 5%) оптические параметры заметно изменяются. Существует несколько наборов коэффициентов, эмпирически определенных для различных диапазонов длин волн [4-9].

С использованием приведенных данных определяется и рабочая температура (температура квазисинхронизма). Для получения высокой эффективности преобразования длины волны необходимо создавать прецизионную периодическую доменную структуру с

минимальной дисперсией периода по длине. В противном случае неоднородность периода приведет к вариации рабочей температуры уменьшению общего коэффициента преобразования. По расчетным для обеспечения высокой эффективности данным дисперсия периода по длине элемента не должна превышать 10-20 нм.

Периоды для генерации второй гармоники ИК излучения составляют от 4 до 15 мкм, а для оптической параметрической генерации и генерации суммарных/разностных частот от 10 до 30 мкм. Характерные периоды для генерации ТГц излучения составляют от 30 до 200 мкм.

На основе проведенного анализа возможных применений, расчетов условий фазового квазисинхронизма и полученных экспериментальных данных была сформулирована оптимальная номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны с использованием РДС в MgOLN (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны с использованием РДС в кристаллах MgOLN для различных типов применений

Тип элемента	Длина волны, нм вход	Длина волны, нм выход	Период доменной структуры, мкм	Рабочая температура, °С	Размеры, (ДхШхВ, мм)
Генерация второй гармоники					
Генерация зеленого света, непрерывные твердотельные Nd:YAG лазеры	1064	532	6.93 - 6.98	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1-3x1
Генерация зеленого света, непрерывные твердотельные Nd:YAG лазеры, цилиндрическая оптика	1064	532	6.93 - 6.98	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1-10x1
Генерация зеленого света, непрерывные волоконные лазеры	1060-1080	530-540	6.9 - 7.25	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1-3x1
Генерация зеленого света, непрерывные волоконные лазеры, цилиндрическая оптика	1060-1080	530-540	6.9 - 7.25	в диапазоне от 30 до 80	10-30x3-10x1

Генерация оранжевого света, непрерывные волоконные лазеры	1178-1180	589-590	9.4-9.46	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1- 3x1
Генерация излучения с длиной волны около 780 нм, непрерывные волоконные лазеры	1530-1600	765-800	18.5-20.9	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1- 3x1
Генерация зеленого света, импульсных ИК лазеров (пс - нс диапазон длительности импульса)	Как для непрерывных лазеров	Как для непрерывных лазеров	В соответствии с периодами для непрерывных лазеров	в диапазоне от 30 до 80	5-10x1- 3x1
Генерация второй гармоники фемтосекундных лазеров	Как для непрерывных лазеров	Как для непрерывных лазеров	В соответствии с периодами для непрерывных лазеров	в диапазоне от 30 до 80	0.5-1x1- 3x1
Генерация синего излучения 488 нм в непрерывном режиме (диодный лазер)	976	488	5.0-5.3	в диапазоне от 30 до 80	5-30x1- 3x1
Генерация синего излучения 488 нм в непрерывном режиме (диодный лазер)	946	473	4.6-4.8	в диапазоне от 30 до 80	5-30x1- 3x1
Оптическая параметрическая генерация					
Оптическая параметрическая генерация	1064	1410 – 2128, 2128 - 4335	27.91, 28.28, 28.67, 29.08, 29.52, 29.98, 30.49, 31.02, 31.59 (в зависимости от температуры и длины волны)	в диапазоне от 30 до 200	1-30x1- 3x1

4. Проверка правильности функционирования узлов спектрометра и прибора в целом и соответствия достигнутых параметров запланированным

4.1 Управляющее программное обеспечение верхнего уровня спектрометра ЭПР

Управляющее программное обеспечение спектрометра верхнего уровня, обеспечивающее интерфейс прибора с пользователем, а именно, задание режимов работы прибора, визуализацию, окончательную обработку и архивирование результатов измерений, реализовано на удаленном персональном компьютере (Хосте). Обмен данными и командами осуществляется через широкополосный двунаправленный интерфейс 10/100BASE-TX. Взаимодействие Хоста и спектрометра организовано в соответствии с архитектурой «КЛИЕНТ-СЕРВЕР», где Хост, являясь КЛИЕНТОМ, обращается к спектрометру (СЕРВЕРУ), посылая ему команды и данные для необходимых настроек, а спектрометр (СЕРВЕР) исполняет полученные команды и передает КЛИЕНТУ пакеты данных.

Структура пакетов данных, передаваемых спектрометром Хосту приведена в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Структура пакетов данных, передаваемых спектрометром Хосту

№	Поле	Длина поля, байт	Описание
1	Длина пакета	2	Количество байтов в последующей части пакета.
2	Статус	2	Набор битовых флагов, характеризующих состояние спектрометра. См. Таблицу 4.2
3	Настройка частоты	2	Состояние счетчика шагов шагового двигателя настройки резонансной частоты измерительного резонатора.
4	Настройка согласования	2	Состояние счетчика шагов шагового двигателя настройки связи измерительного резонатора.
5	Уровень «Поглощения»	2	Уровень сигнала ПЧ на выходе квадратурного смесителя,

			настроенного на фазу сигнала «поглощения».
6	Уровень «Дисперсии»	2	Уровень сигнала ПЧ на выходе квадратурного смесителя, настроенного на фазу сигнала «дисперсии».
7	Частота генератора СВЧ	3	Мгновенная частота генератора СВЧ.
8	Мощность СВЧ	2	Уровень мощности СВЧ на измерительном резонаторе.
9	Магнитное поле и его статус.	4	Индукция поляризирующего магнитного поля. Статус указывает, определено поле измерением, или интерполяцией.
10	Данные	4 либо 1024	Синфазная и квадратурная компоненты текущей измеренной точки (2х2байта) в случае стандартного режима измерений или блок последовательных данных (1024 байтов) в случае измерения с высоким временным разрешением (импульсный режим).

Количество передаваемых спектрометром Хосту полей в пакете данных определяется запросом (командой), в ответ на который отсылается пакет. Обязательным ответом является передача поля статуса (Поле 2), значение битов которого приведено в Таблице 4.2. В ответ на команду *EXSTATREQUEST* (Таблица 4.3.) передается расширенный статус (поля до восьмого включительно). Остальные поля передаются в ответ на соответствующий запрос Хоста.

Поле «Статус» содержит битовые флаги, указывающие на наличие того или иного состояния спектрометра, требующего определенной реакции Хоста.

Таблица 4.2 – Значение битов поля статуса

Бит	Байт	Флаг
0	0	Ошибка ФАПЧ Синтезатора
1		Ошибка ФАПЧ Гетеродина
2		Ошибка ФАПЧ Сигнального Генератора
3		Ошибка загрузки АЦП
4		Перегрузка АЦП
5		Ошибка балансировки моста
6		Ошибка настройки фазы детектора
7		Ошибка установки магнитного поля
8	1	Ошибка измерения магнитного поля
9		Ошибка установки СВЧ мощности
10		-----
11		-----
12		-----
13		-----
14		-----
15		Исполнение команды продолжается

Запрос состоит из байта, содержащего код команды, и поля данных, если они необходимы. Список команд, предусмотренных текущей версией программного обеспечения приведен в Таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Список команд, предусмотренных текущей версией программного обеспечения

№	Команда	Код (HEX)	Длина поля данных (байт)	Возможные значения	Описание	Длина ответного пакета (байт)
1	<i>PWRON</i>	10	1	1,0	Включить/отключить питания СВЧ и аналоговой платы.	4
2	<i>MWBRIDGEADJ</i>	11	0	-	Запуск алгоритма	4

					автоматической балансировки СВЧ моста.	
3	<i>MATCHSTEP</i>	12	1	-128,..127	Шаг по настройке коэффициента связи резонатора (согласования).	4
4	<i>TUNESTEP</i>	13	1	-128,..127	Шаг по настройке резонансной частоты резонатора.	4
5	<i>ABS_REL AFC</i>	14	1	1,0	АПЧ по внешнему/рабочему. резонатору.	4
6	<i>SLOW_FAST</i>	15	1	1,0	Измерения в стандартном/импульс ном режиме.	4
7	<i>PHASEADJ</i>	16	1	1,0	Режим настройки фазы/рабочий.	4
8	<i>DETPHASESET</i>	17	2	0,..16383	Установка фазы детектора.	26
9	<i>ADCFILTERLOAD</i>	18	1034	1034x(0..255)	Загрузка файла фильтра АЦП	4
10	<i>QUADDETLOAD</i>	19	1025	0,..7 1024x (0,.. 262143)	Загрузка квадратурного детектора опорной последовательностью Номер блока данных (0..3 - COS, 4..7 - SIN), 256 коэффициентов.	4
11	<i>EXSTATREQUEST</i>	1A	0	-	Запрос статуса.	17
12	<i>EXIT</i>	1B	0	-	Прерывает	4

					выполнение скана.	
13	<i>STMWPRSET</i>	20	3	0,..4095 0,..7	Устанавливает ослабление плавного и ступенчатых аттенюаторов СВЧ фонового режима.	4
14	<i>PULSEMODELOAD</i>	21	19	0,.. 16777215, 0,.. 16777215, 0,.. 16777215, 0,.. 16777215, 0,.. 16777215, 0,.. 65535, 1,0, 1,0	Загрузка режима импульсных измерений: 1) постоянное поле, 2) задержка до начала регистрации, 3) задержка до выходного синхроимпульса, 4) задержка до начала импульса, 5) задержка до окончания импульса, 6) коэффициент прореживания потока, 7) внешний/внутренний источник запуска, 8) Импульс СВЧ/магнитного поля.	4
15	<i>GAINSET</i>	22	2	0,..4095	Установка усиления по ПЧ.	4
16	<i>ISHIFT</i>	23	2	0,..4095	Компенсация смещения в канале поглощения.	4
17	<i>QSHIFT</i>	24	2	0,..4095	Компенсация смещения в канале	4

					дисперсии.	
18	<i>QGAIN</i>	25	2	0,..4095	Установка усиления в канале дисперсии	4
19	<i>PULSEMODESTART</i>	26	0	-	Запуск импульсных измерений.	1046
20	<i>MODLOAD</i>	30	9	0,..2, 0,..63, 0,.. 268435455, 0,..4095, 0,..6.	Загрузка параметров модуляции: 1) сигнал синусоидальный, треугольный, режима, 2) амплитуда модуляции, 3) частота модуляции, 4) фаза, 5) коэффициент прореживания потока данных.	4
21	<i>MAGNFIELDEXAM</i>	40	0	-	Измерить магнитное поле.	26
22	<i>SCANLOAD</i>	41	11	0,.. 16777216, 0,.. 16777216, 0,.. 16777216, 0,..65535.	Загрузить параметры скана: 1) начальное поле, 2) конечное поле, 3) шаг по полю, 4) количество накоплений.	26

Программное обеспечение Хоста разработано в среде визуального программирования LabVIEW фирмы National Instruments и предназначено для работы на персональном компьютере в операционной системе WINDOWS. Интерфейс пользователя представляет из себя «виртуальный прибор», т.е. на экран компьютера выводится изображение панели управления спектрометром, со всеми необходимыми органами управления и индикаторами. Пользователь управляет прибором при помощи клавиатуры и

мышью, вводя в поля ввода необходимые значения, выбирая их из списка или двигая соответствующий орган управления (Рисунки 4.1, 4.2, 4.3). При запуске скана в стандартном режиме или записи отклика в импульсном режиме регистрации открывается новое окно, графически визуализирующее процесс, изменить параметры ее визуализации или сохранить результат в архив измерений, а также экспортировать результаты измерения в ставший стандартом формат фирмы BRUKER (Рисунок 4.4).

4.2 Проверка правильности функционирования узлов спектрометра и прибора в целом

Испытание разработанных и изготовленных узлов спектрометра продемонстрировали правильность выбора архитектуры и схемотехнических решений. Основные параметры соответствуют запланированным, а некоторые параметры улучшены. Так, потребляемая мощность уменьшена с запланированных 200 Вт до 60 Вт, а габариты с $400*400*170\text{мм}^3$ до $300*265*170\text{мм}^3$.

Предусмотрена дополнительная возможность одновременной регистрации обеих квадратурных компонент сигнала ЭПР при использовании модуляции. Таким образом, пользователь имеет возможность произвольно ориентировать координатные оси, на которые производится проектирование вектора сигнала, что дает возможность учитывать при анализе спектра времени релаксации различных парамагнитных центров, если их спектры накладываются.

Кроме того, расширена функциональность прибора за счет введения дополнительного режима работы: импульсного изменения поляризующего магнитного поля на величину в пределах амплитуды модуляции ($\sim 3\text{ мТ}$).

Реализован гибко конфигурируемый импульсный режим работы с максимальным временным разрешением при регистрации однократных процессов 5нс (амплитудное разрешение 8 бит). Глубина записи составляет 8188 точек, что при максимальной предусмотренной степени децимации позволяет проводить запись процессов длительностью до ~ 2.7 секунд. Предусмотрена независимая установка задержки выработки импульса, начала записи и выработки синхроимпульса для запуска необходимого внешнего оборудования с шагом дискретности 10 нс, внутренний или внешний источник стартового импульса.

Программное обеспечение спектрометра обладает высокой функциональностью и обеспечивает оператора удобными инструментами управления и контроля режимов

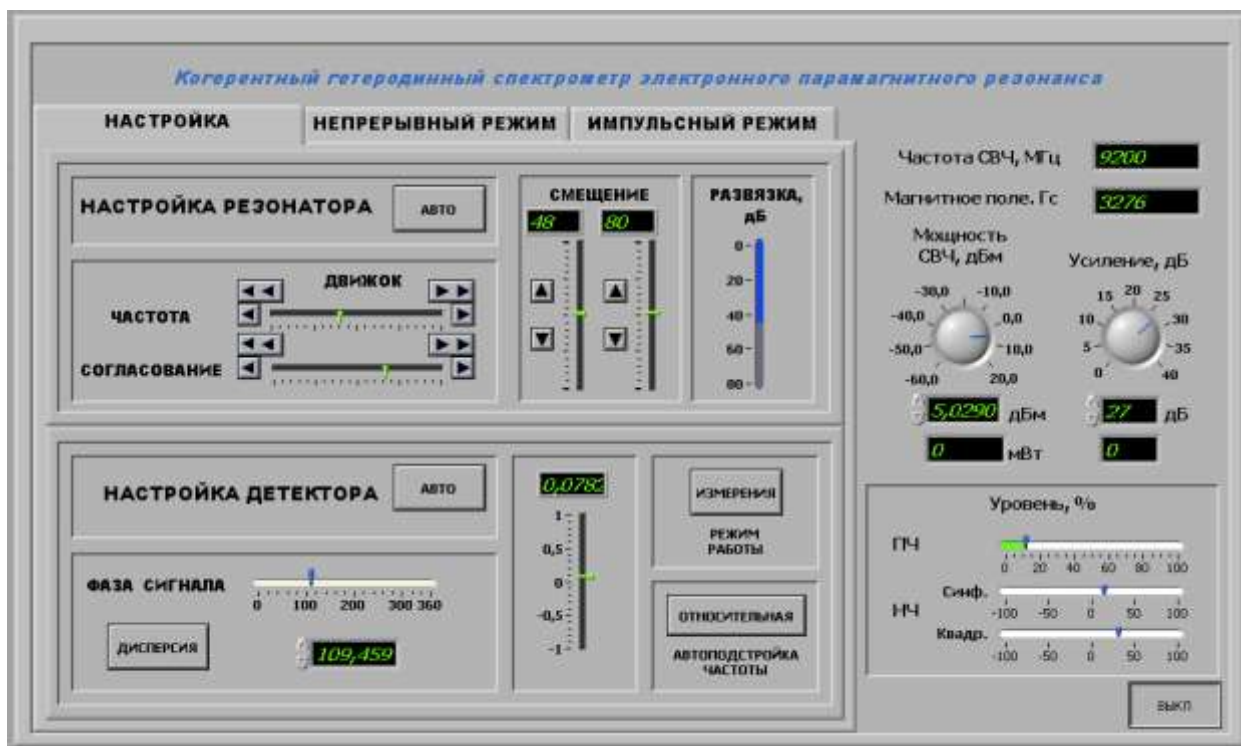


Рисунок 4.1 – Панель управления спектрометром. Вкладка «Настройка»

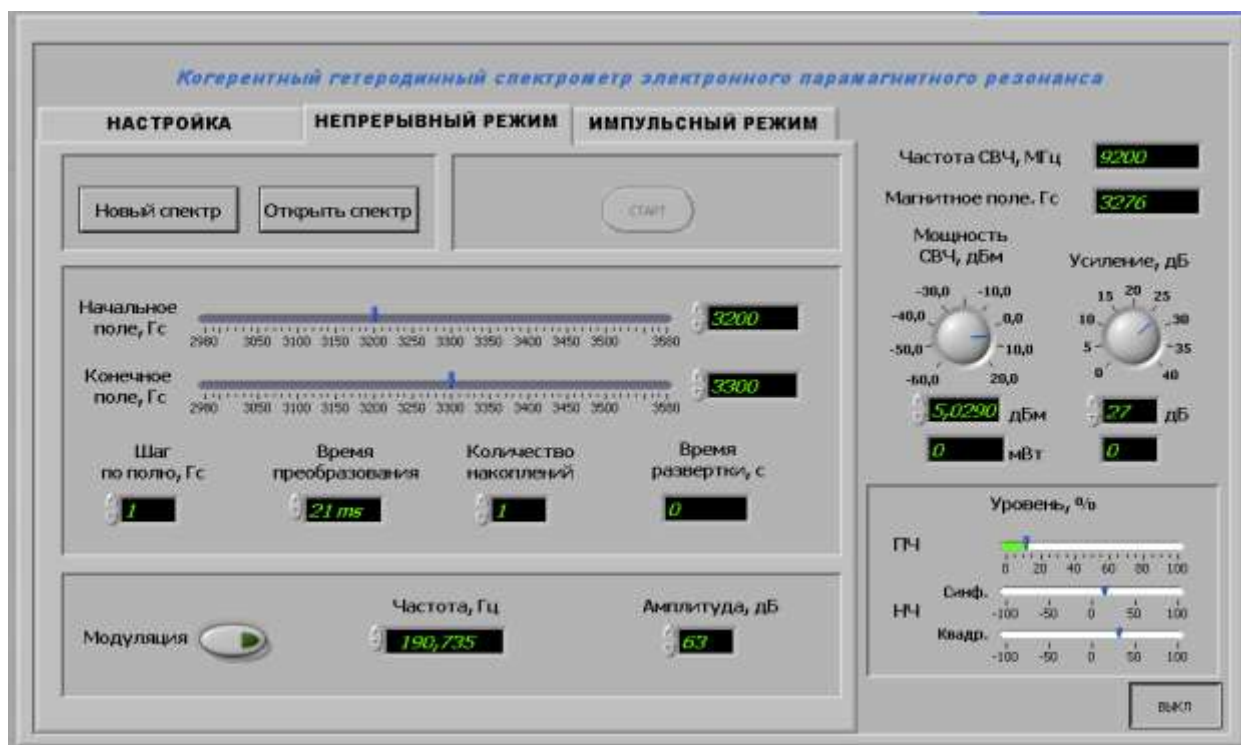


Рисунок 4.2 – Панель управления спектрометром. Вкладка «Непрерывный режим»

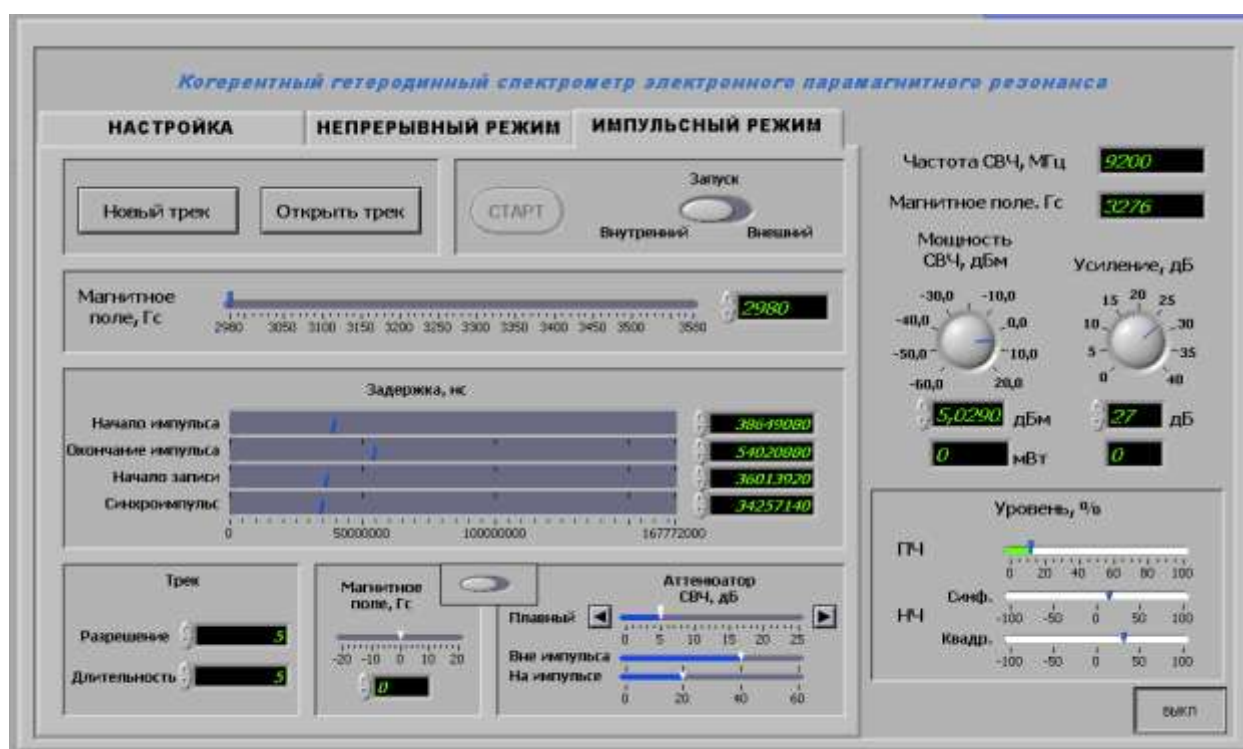


Рисунок 4.3 – Панель управления спектрометром. Вкладка «Импульсный режим»

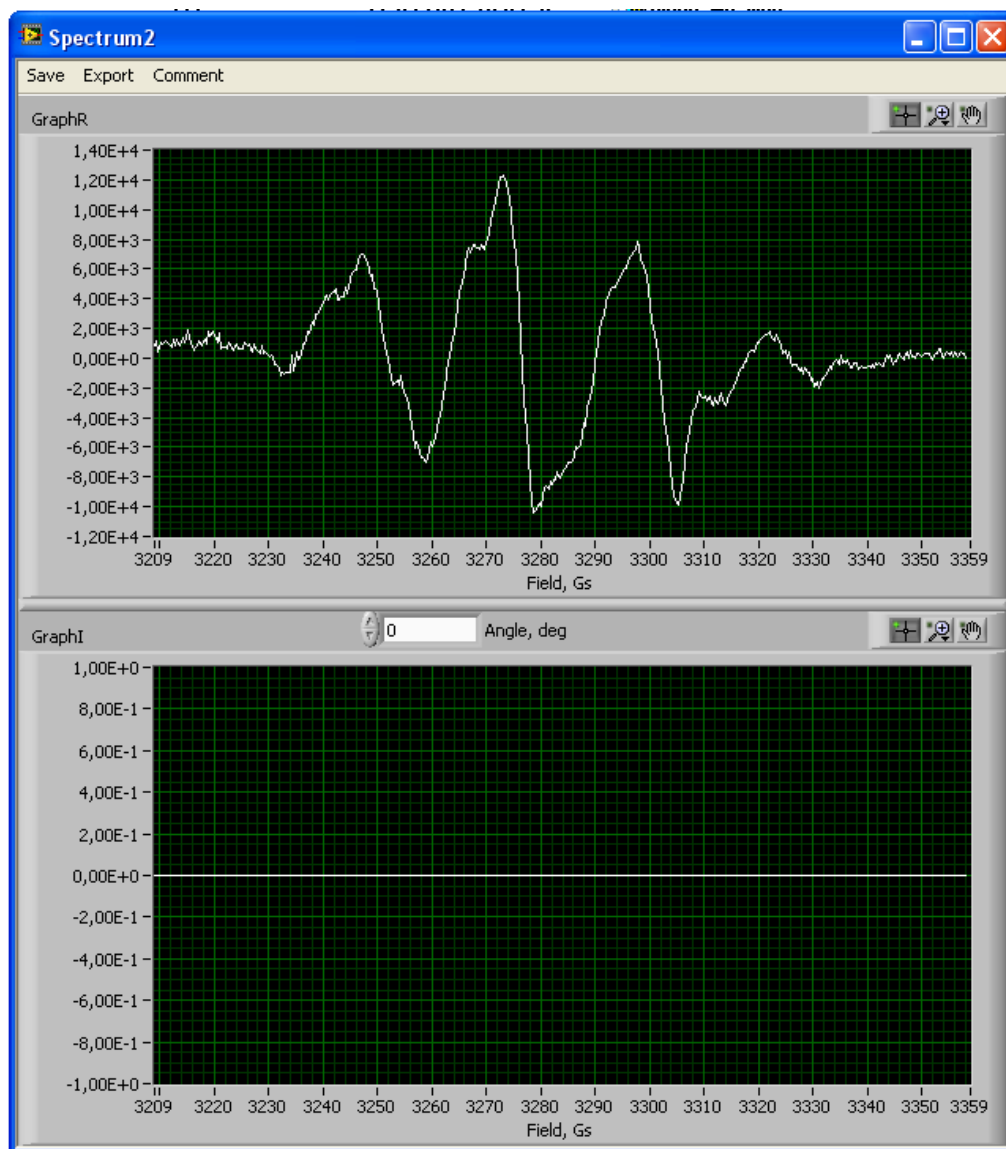


Рисунок 4.4 – Окно регистрации спектра. Спектр соответствует синфазной компоненте квадратурного сигнала (Фазовый угол 0)

работы прибора. Предусмотрена возможность сохранения результатов измерения в стандартном формате для обмена с другими средствами обработки спектральных данных.

Использование для связи со спектрометром стандартного сетевого интерфейса 10/100BASE-TX и протокола TCP/IP снимает ограничение на взаимное расположение прибора и оператора, что дает возможность удаленного управления прибором, а также использовать в качестве рабочего места оператора любой настольный или портативный компьютер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения проекта получены следующие обобщающие научно-технические результаты.

Разработаны оптимальные принципы построения датчиков широкого применения с использованием сенсоров магнитного поля, функционирующих на основе эффектов магнитосопротивления и гигантского магнитного импеданса. Они использованы при создании новой топологии магниточувствительных элементов и конструктивных элементов датчика электрического тока.

Проведены испытания разработанных оксидных материалов для топливных элементов, в модельных электрохимических устройствах. Они включали получение требуемых оксидных материалов, проведение их аттестации, подготовку единичной ячейки топливного элемента планарного типа, проведение испытания опытного образца топливного элемента с двумя типами катодов. Получены вольтамперные характеристики и оценена эффективность работы устройства на полноту сгорания топлива, и стабильность работы во времени.

Проведены анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого светового нагрева. Показано, что изменение длительности импульсов и плотности энергии позволяет управлять анизотропией роста доменных лучей и их средним периодом. Последующее приложение электрического поля позволяет изготавливать периодические доменные структуры в монокристаллах ниобата лития, обладающие повышенной пространственной однородностью. На основе проведенного анализа возможных применений периодических доменных структур, расчетов условий фазового квазисинхронизма и полученных экспериментальных данных сформулирована оптимальная номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны для построения приборов на новых физических принципах с использованием РДС в MgOLN.

Проведено испытание разработанных и изготовленных узлов ЭПР-спектрометра, которое показало правильность выбора архитектуры и схемотехнических решений, использованных в приборе. Основные параметры ЭПР-спектрометра соответствуют запланированным, а некоторые параметры улучшены. Предусмотрена дополнительная возможность одновременной регистрации обеих квадратурных компонент сигнала ЭПР при использовании модуляции. Расширена функциональность прибора за счет введения

дополнительного режима работы: импульсного изменения поляризующего магнитного поля на величину в пределах амплитуды модуляции.

Таким образом, техническое задание шестого этапа работ по Государственному контракту на тему «Высокоточные измерительные приборы и высокоэффективные функциональные устройства на основе новых физических принципов» выполнено полностью. Результаты, полученные на данном этапе и по проекту в целом, соответствуют мировому уровню, востребованы наукоемкими отраслями экономики, а также способствовали подготовке и закреплению в сфере науки и образования молодых научных и научно-педагогических кадров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Литература к разделу 1

1. Маргелов А. Модульные и компонентные магниторезистивные датчики и компасы Honeywell // Новости электроники.- 2006. -Т. 10. -С. 10-14.
2. Tumanski S. Thin film magnetoresistive sensors // IOP Publ. -2000. -P. 576.
3. Kujik K. Variable dynamic range magnetoresistive head. US patent 4141051. 1979.
4. Tsang C., Fontana R.E. Fabrication and wafer testing of barber-pole and exchange-biased narrow-track MR sensors // IEEE Trans. Magn.- 1977. -V. 33. -P. 1149-1151.
5. Cain W.C., Lee J.W., Koeppel P.V., Kryder M.H. Exchange coupled NiFe-TbCo thin films for use in self-biased magnetoresistive heads // IEEE Trans. Magn. -1988. -V. 24. -P. 2609-2611.
6. Takada A., Honda T., Abe M., Kanno Y., Shibata T., Soda Y. Vertical AMR sensor with new magnetic stabilizing design // IEEE Trans. Magn. -1982. -V. 18. -P. 2932-2934.
7. <http://www.ssec.honeywell.com/>
8. Лысенко А.Н., Штурма И.Ю. Электронный магнитный компас на базе магниторезистивных датчиков и микроконтроллера серии MSC1200 фирмы Texas Instruments // Электроника и связь. -2010. -Т. 1. -С. 40-43.
9. Маргелов А. Магниторезистивные датчики положения компании Honeywell // Chip News 3. -2005. -С. 60-65.
10. Caruso M.J., Bratland T., Smith C.H., Schneider R. A new perspective on magnetic field sensing // Sensors. -1998. -V. 12. -P. 34-46.
11. Caruso M.J., Withanawasam L.S. Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors // <http://www.honeywell.com/>
12. Treutler C.P.O. Magnetic sensors for automotive applications // Sensors and Actuators A.- 2001. -V. 91. -P. 2-6.
13. Fleming W.J. Overview of Automotive Sensors // IEEE Sensors Journal - 2001. -P. 296-308.
14. Васильева Н.П., Касаткин С.И., Муравьев А.М. Тонкопленочные магниторезистивные датчики магнитного поля и области их применения // Датчики и системы 1. -1999. -С. 29–36.
15. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы // Компоненты и технологии 4. -2005.
16. Ripka P. (Ed.), Magnetic Sensors.- Artech, Boston.-2001.

17. Makhotkin V.E., Shurukhin B.P., Lopatin V.A., Marchukov P. Yu., Levin Yu. K. Magnetic field sensors based on amorphous ribbons // *Sens. Actuators, A*.- 1991.- V. 27.- P. 759–762.
18. Nakai T., Takada K., Abe H., Hoshi N., Suzuki H., Ishiyama K., Arai K.I. Magnetic field measurement using step-like GMI sensor combined with differential circuit // *J. Magn. Soc. Jap.*- 2007.- V. 31.- P. 216–220.
19. Nakai T., Ishiyama K., Yamasaki J. Analysis of steplike change of impedance for thin-film giant magnetoimpedance element with inclined stripe magnetic domain based on magnetic energy // *J. Appl. Phys.*- 2007.- V. 101.- P. 09N106.
20. Yuji Nishibe, Norikazu Ohta, Koji Tsukada, Hideya Yamadera, Yutaka Nonomura, Member, Kaneo Mohri. Sensing of passing vehicles using a lane marker on a road with built-in thin-film MI sensor and power source // *IEEE Trans. Veh. Technol.*- 2004.- V. 53, No. 6.- P. 827–1834.
21. Shladover S. E., Desoer C. A., Hedrick J. K., Tomizuka M., Walrand J., Zhang W. B., McMahon D. H., Peng H., Sheikholeslam S., and McKeown N. Automatic vehicle control developments in the PATH program // *IEEE Trans. Veh. Technol.*- 1991.- V. 40.- P. 114–130.
22. Asaoka A. and Ueda S. An experimental study of a magnetic sensor in an automated highway system // *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp., Tokyo, Japan.*-1996.- P. 38–43.
23. Senda M., Ishii O., Koshimoto Y., and Toshima T. Thin-film magnetic sensor using high frequency magneto-impedance (HFMI) effect // *IEEE Trans. Magn.*- 1994.- V. 30.- P. 4611–4613. 1994.
24. Takezawa M., Kikuchi H., Ishiyama K., Yamaguchi M., and Arai K. I. Micro magnetic thin film sensor using LC resonance // *IEEE Trans. Magn.*- 1997.- V. 33.- P. 3400–3402.
25. Uchiyama T., Itoh T., Mohri K., Nakashima K., Sasagawa S., Ohuchi J. and Y. Sudoh. Car sensing method using amorphous wire CMOS MI sensor built into a disk installed on a road // *J. Magn. Soc. Jap.*- 2000.- V. 24, No. 4.- P. 775–778.
26. Morikawa T., Nishibe Y., Yamadera H., Nonomura Y., Takeuchi M., Taga Y. Giant magneto-impedance effect in layered thin films // *IEEE Trans. Magn.*- 1997.- V. 33.- P. 4367–4372.
27. Hauser H., Steindl R., Hausleitner C., Nicolics J., Pohl A. Miniaturized magnetic field sensors utilizing giant magneto-impedance [GMI] effect and surface acoustic wave [SAW] // *Sens. Mater.* -2001.- V. 13, No. 1.- P. 25–40.
28. Reindl L. and Ruile W. Programmable reflectors for SAW-ID-tags // *Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium.*- 1993.- P. 125–130.
29. Steindl R., Pohl A., Seifert F. Impedance loaded SAW sensors offer a wide range of measurement opportunities // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*- 1999.- V. 47.- No. 12.- P. 2625–2629.

Литература к разделу 2

1. Бронин Д.И., Кузин Б.Л., Соколова Ю.В., Н.В. Полякова Н.В. Взаимодействие кобальтсодержащих материалов с твердым электролитом на основе галлата лантана // Журн. прикл. химии. – 2000. – Т. 73. – №9. – С. 1482-1485.
2. Tsipis E.V., Kharton V.V. Electrode materials and reaction mechanisms in solid oxide fuel cells: a brief review. // J. Solid State Electrochem., – 2008. – V. 12. – P. 1367-1391.
3. Datta P., Majewski P., Aldinger F. Synthesis and characterization of strontium and magnesium substituted lanthanum gallate–nickel cermet anode for solid oxide fuel cells. // Mater. Chem. Phys. – 2007. – V.102. – P. 125–131.
4. Zinkevich M., Geupel S., Aldinger F. Thermodynamic assessment of the ternary systems Ga–Mg–O, Ga–Ni–O, Mg–Ni–O and extrapolation to the Ga–Mg–Ni–O phase diagram. // J. Alloys and Compounds. – 2005. – V. 393. – P.154–166.

Литература к разделу 3

1. Lobov A.I., Shur V.Ya., Kuznetsov D.K., Negashev S.A., Pelegov D.V., Shishkin E.I., Zelenovskiy P.S. Discrete switching by growth of nano-scale domain rays under highly-nonequilibrium conditions in lithium niobate single crystals // Ferroelectrics. - 2008. - V. 373. - P. 99-108.
2. Shur V.Ya., Kuznetsov D.K., Lobov A.I., Nikolaeva E.V., Dolbilov M.A., Orlov A.N., Osipov V.V., Formation of self-similar surface nano-domain structures in lithium niobate under highly nonequilibrium conditions // Ferroelectrics. - 2006. - V. 341. - P. 85-93.
3. Shur V.Ya., Rumyantsev E.L., Nikolaeva E.V., Shishkin E.I., Fast and superfast motion of ferroelectric domain boundaries // Integrated Ferroelectrics. - 2003. - V. 59. - P. 1493-1503.
4. Shen, H. Y., H.. Xu, Z. D. Zeng, W. X. Lin, R. F. Wu, and G. F. Xu. Measurement of Refractive Indices and Thermal Refractive-Index Coefficients of Linbo3 Crystal Doped With 5 Mol. % Mgo. // Appl. Opt. - 1992. -V.31. -P. 6695-6697.
5. Paul, O., A. Quosig, T. Bauer, M. Nittmann, J. Bartschke, G. Anstett, and J. A. Lahuillier. Temperature-Dependent Sellmeier Equation in the Mir for the Extraordinary Refractive Index of 5% Mgo Doped Congruent Linbo3. // Applied Physics B: Lasers and Optics. - 2007. - V. 86. P. - 111-115.
6. Gayer, O., Z. Sacks, E. Galun, and A. Arie. Temperature and Wavelength Dependent Refractive Index Equations for Mgo-Doped Congruent and Stoichiometric Linbo3. // Applied Physics B: Lasers and Optics. - 2008. - V. 91. - P. 343-348.

7. Zelmon, David E., David L. Small, and Dieter Jundt. Infrared Corrected Sellmeier Coefficients for Congruently Grown Lithium Niobate and 5 Mol.% Magnesium Oxide --doped Lithium Niobate. // J. Opt. Soc. Am. B. 0 1997. - V. 14. - P. 3319-3322.
8. Zhang, De-Long, Qing-Zhong Yang, Ping-Rang Hua, Hong-Li Liu, Yu-Ming Cui, Liang Sun, X. u. Yu-Heng, and Edwin Yue-Bun Pun. Sellmeier Equation for Doubly Er/mg-Doped Congruent Linbo3 Crystals. // J. Opt. Soc. Am. B. - 2009. - V. 26. - P. 620-626.
9. Schlarb, U., and K. Betzler. Influence of the Defect Structure on the Refractive Indices of Undoped and Mg-Doped Lithium Niobate. // Physical Review B. - 1994. - V. 50. - 751-757.